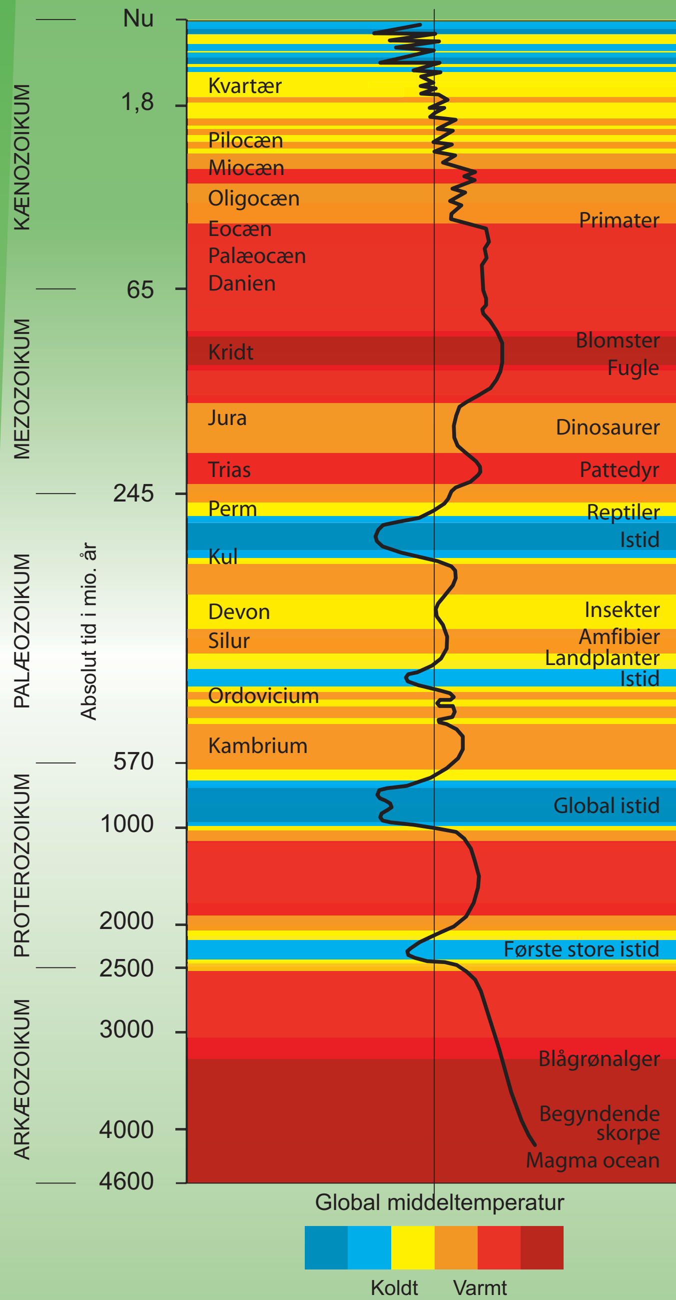
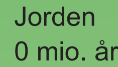
NATURVIDENSKAB FOR ALLE

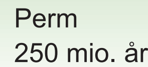








Jura
150 mio. år







Silur
425 mio. år

Kambrium
550 mio. år



Jordens klima fortid og fremtid

2. Årgang Nr. 2 / 2008

VISIT…

LANZAROTE

Caliente.COM

Hvad styrer Jordens klima?

Jordens klima skabes i et komplekst samspil mellem landjorden, havene, atmosfæren og biosfæren. Store klimasvingninger skyldes især variationer i Jordens bane omkring Solen, ændringer i de globale havstrømme, forandringer i isens udbredelse og vekslende mængder af drivhusgasser i atmosfæren.

Gennem Jordens 4,6 milliarder år lange historie har klimaet både været meget varmere og meget koldere end nu, og over meget lange tidsrum er det især kontinentalpladernes bevægelser, som bestemmer klimaet. Når kontinenter dannes eller forsvinder, ændres de globale havstrømme, og når nye bjergkæder som fx Alperne eller Himalaya skyder op, forandres vindmønstrene.

Et eksempel på den enorme betydning af kontinentaldriften er forløbet efter løsrivelsen af Antarktis fra Australien og New Zealand for 96 millioner år siden. Gennem de følgende millioner af år bevægende det nye kontinent sig mod syd, og for 40-35 millioner år siden opstod der en cirkulær havstrøm omkring Antarktis, der isolerede kontinentet fra de varme tropiske vandmasser, som tidligere havde givet et mildt klima. Afkølingen af Sydhavet og nedisningen af Antarktis gav sandsynligvis startskuddet til den gradvise afkøling, som har præget Jordens klima gennem de seneste 35 millioner år.



Figur 1.1
Opbruddet af superkontinentet Gondwana og isoleringen af Antarktis ved Sydpolen fik afgørende indflydelse på Jordens klima.

Istider og mellemistider

For omkring 2,75 millioner år siden begyndte iskapper at vokse frem på den nordlige halvkugle, og lige siden har Jorden haft istider og mellemistider.

Skiftene mellem istider og mellemistider er de mest dramatiske klimasvingninger på Jorden i nyere tid. I sidste istid, som ifølge nye analyser af iskerner fra Indlandsisen på Grønland sluttede for 11.700 år siden, var det globale klima omkring 6 grader koldere end i dag, mens temperaturerne på de høje breddegrader var op til 20 grader lavere. Analyserne viser også, at overgangen til nutidens varme klima var forbløffende pludselig; skiftet tog kun få årtier.

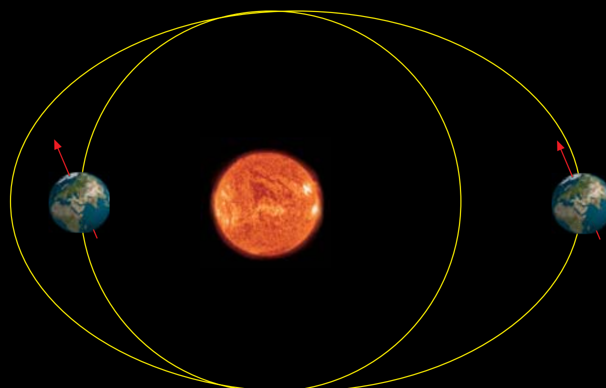
Hvad kan få en kæmpemæssig og ekstremt kompleks mekanisme som Jordens klimasystem til at ændre tilstand nærmest fra det ene øjeblik til det næste? Ikke engang verdens førende klimaforskere kan give et definitivt og udtømmende svar, men forskerne har identificeret de vigtigste spillere på banen: Ændringer i solindstrålingen som følge af variationer i Jordens kredsløb omkring Solen; forandringer i udbredelsen af iskapperne og havisen; ændringer i de globale havstrømme og vekslende mængder af drivhusgasser i atmosfæren.



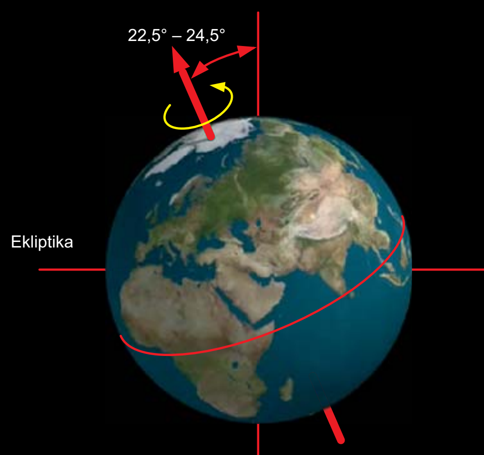
Figur 1.2
Da den sidste istid kulminerede for 21.000 år siden, var Canada, Nordeuropa og Sibirien dækket af enorme iskapper. I alt rummede iskapperne omkring 50 millioner kubikkilometer vand, og vandstanden i verdenshavene var 130 meter lavere end i dag.

Tre astronomiske cykler

Jordens kredsløb omkring Solen varierer over tre forskellige cykler:



Jordbanens form: Over en cyklus på knap 100.000 år varierer jordbanens form mellem en næsten cirkulær bane og en elliptisk bane. Jo mere elliptisk banen er, jo større forskel er der på Jordens største og mindste afstand til Solen, og jo større forskel er der på den største og den mindste solindstråling i løbet af et år. Samtidig formindskes den totale solindstråling en smule, når banen er mest elliptisk.



Jordaksen hældning: Jorden roterer omkring sig selv, men rotationsaksen står ikke vinkelret på elipseplanet. Hældningen varier indenfor et interval på mellem 21,39 grader og 24,36 grader over en periode på 41.000 år. Jo mindre vinklen er, jo lavere står middagssolen på de høje breddegrader om sommeren, og jo kortere bliver sommerdagene med direkte solindstråling på de nordlige kontinenter.

Snurretopeffekten: Over en periode på 21.700 år svinger Jordens rotationsakse også omkring sig selv som en snurretop. Snurretopbevægelsen skaber periodiske variationer i længden af sommer og vinter på den nordlige og sydlige halvkugle.





De tre astronomiske cykler har varierende betydning for Jordens klima over tid. Da istiderne startede, blev iskapperne dannet og smeltet over en cyklus på 41.000 år i takt med variationerne i jordaksens hældning. Men under den gradvise afkøling af Jorden skete der for 900.000 år siden et skift, hvor ændringerne i jordbanens form blev dominerende, så istiderne fik en varighed på omkring 100.000 år afbrudt af mellemistider på 10.000 til 30.000 år.

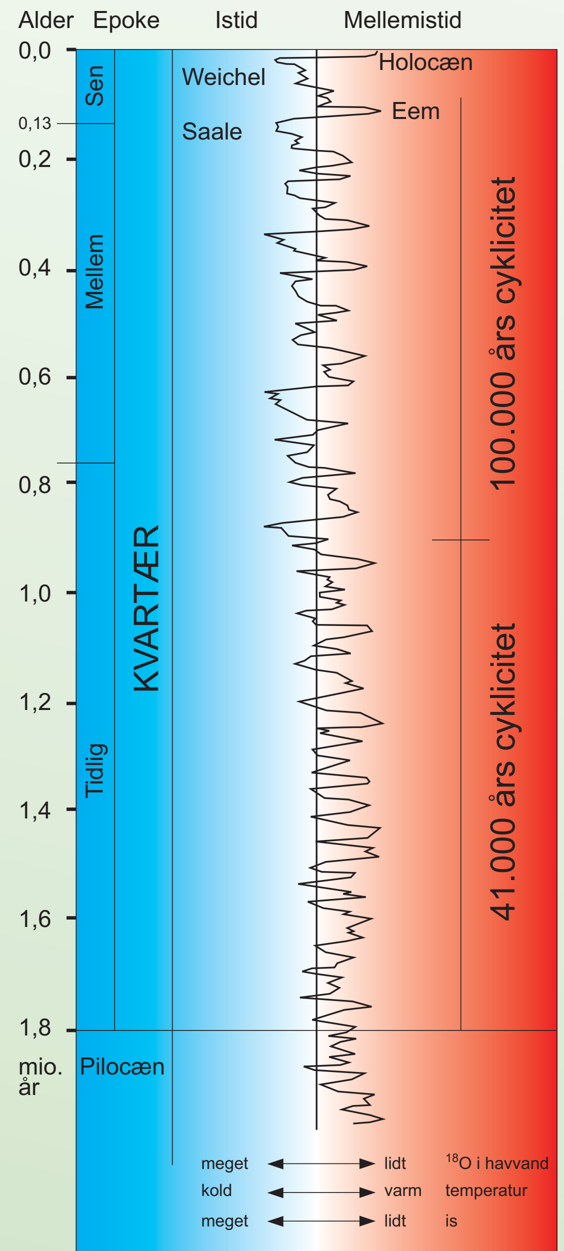
Jordens kredsløb omkring Solen

Allerede i 1863 opdagede James Croll, som dengang var portner på universitetet i Glasgow, at skiftene mellem istider og mellemistider hang sammen med små ændringer i solindstrålingen som følge af periodiske variationer i Jordens kredsløb omkring Solen.

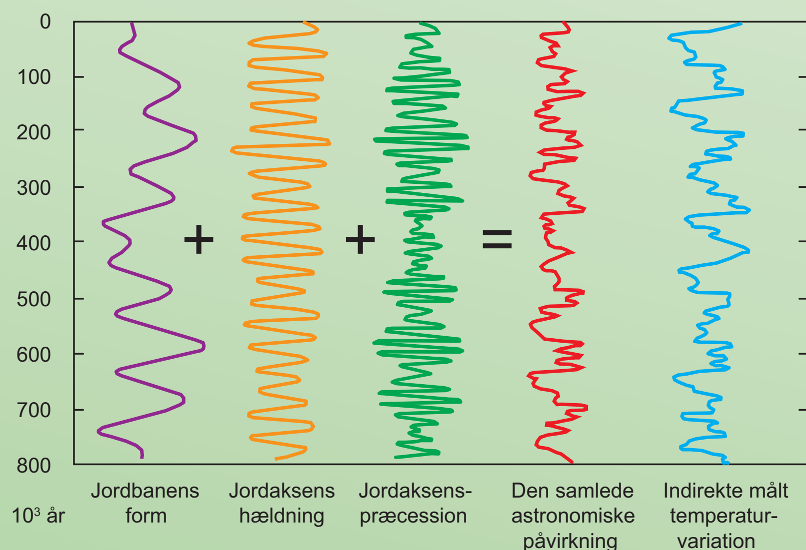
I 1914 viste den jugoslaviske ingeniør Milutin Milankovitch, at den afgørende faktor er solindstrålingen på den nordlige halvkugles kontinenter om sommeren. Når solindstrålingen er lille i sommerhalvåret, smeltes kun en beskeden mængde af den sne og is, som ophobes på kontinenterne om vinteren, og derfor vokser iskapperne. Nedisningen er selvforstærkende på grund af albedoeffekten. Albedoeffekten er et udtryk for, at hvid sne og is reflekterer op imod 90 procent af sollyset tilbage til rummet, mens mørke have og isfrit land opsuger det meste af solvarmen. Så jo mere iskapperne og havisen vokser, jo mindre opvarmes jordoverfladen, og jo koldere bliver det.

Når Jordens kredsløb omkring Solen ændrer sig, så de nordlige kontinenter får meget sollys om sommeren, begynder isen at smelte, albedoeffekten formindskes, og havene og landjorden opsuger mere varme. På den måde starter en varm mellemistid.

De astronomisk betingede variationer i solindstrålingen og forstærkningen via albedoeffekten er imidlertid langt fra kraftige nok til at forklare de dramatiske klimaskift mellem istider og mellemistider. Havstrømmene og drivhusgasserne spiller også med.



Figur 1.4
Temperaturvariationer gennem de seneste 1,8 millioner år målt i havbundskerner. Forholdet mellem to stabile iltisotoper – den tunge ^{18}O og den almindelige ^{16}O viser, hvor koldt eller varmt havvandet var, da sedimenterne blev aflejret på havbunden.



Figur 1.5
De tre astronomiske cyklers individuelle og samlede effekt på den mængde sollys, som Jorden har modtaget gennem de seneste 800.000 år. Kurven til højre viser isotopmålinger på havbundskerner, som giver et indirekte mål for temperaturens svingninger i samme periode.

De globale havstrømme

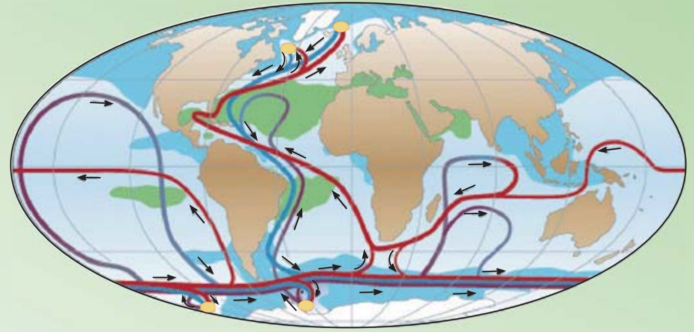
De globale havstrømme transporterer varme fra Ækvator mod polerne, og i mellemistider er der god gang i cirkulationen. Varmt overfladevand strømmer fra Stillehavet gennem det Indiske Ocean, syd om Afrika og nordpå gennem Atlanterhavet. På vejen forbi Ækvator og videre op til de høje breddegrader afgiver overfladevandet varme og ferskvand ved fordampning. Nord for Island er overfladevandet efterhånden blevet så salt, koldt og tungt, at det synker til bunds og danner en sydgående dybhavsstrøm, som har udløbere ved Antarktis, i det Indiske Ocean og i Stillehavet. Undervejs stiger bundvandet op til overfladen og opvarmes igen, og cirklen er sluttet.

Siden afslutningen af sidste istid har de globale havstrømme kørt som en velsmurt maskine og givet Jorden et varmt og stabilt klima.

I istiden var havstrømmene både svagere og mere omskiftelige, og konsekvensen var et ustabilt klima, hvor den bidende kulde flere gange blev afbrudt af mildere perioder. På de nordlige breddegrader blev klimaet pludselig 10 grader varmere på få år, og bagefter blev det langsomt koldere igen i løbet af nogle århundreder eller årtusinder. En så brat opvarmning kræver en pludselig indskrænkning af iskappernes og havisens udbredelse, og ændringer i havstrømmene kan udløse begge dele.

Den vigtigste pumpe i havcirkulationen er nedsynkning af salt og tungt overfladevand i Nordatlanten, og i istidens kolde perioder skete nedsynkningen syd for Island, hvorved varmetransporten til de høje breddegrader var afbrudt. Nedsynkningen standsede endda flere gange helt. Det skete, fordi store dele af isdækket i Nordamerika kollapsede – sandsynligvis, fordi iskappen var vokset til en højde, hvor den blev ustabil – og enorme mængder af isbjerge blev sendt ud gennem Hudson Strædet. Da isbjergene smeltede på havet, blev vandet i overfladen så ferskt og let, at nedsynkningen gik i stå.

Mens havstrømmene var slukkede eller på vågeblus, steg saltholdigheden i Nordatlanten langsomt via den fordampning, som trods alt sker fra havet selv i kolde perioder, og samtidig voksede de ferske iskapper, hvilket også øger saltholdigheden i havet. Andre forhold som ændringer af de store floders udløb, bevægelser af havisen og forandrede vindmønstre kan også have bidraget til at gøre vandet i Nordatlanten mere salt.



Figur 1.6
Nutidens termohaline havcirkulation. Overfladestrømme er farvet røde, dybe strømme blå og bundstrømme lilla. Nedsynkningsområderne i nord og syd er markeret med gule ovaler. Grøn skravering markerer havområder med høj saltholdighed, mens saltholdigheden er lav i de områder, som er skraveret med blåt.

Da saltholdigheden nåede over en kritisk grænse, startede nedsynkningen af overfladevand igen i Nordatlanten, og havstrømmene begyndte atter at cirkulere og sprede varme. På den måde udløste de genstartede havstrømme de bratte temperaturstigninger, der fik havisen til at svinde ind, og iskapperne til at trække sig tilbage. De efterfølgende langsomme temperaturfald skete så i takt med, at havstrømmene atter svækkedes, og iskapperne stille og roligt blev bygget op igen og afkølede klimaet.

Ved istidens afslutning fik landmasserne på den nordlige halvkugle masser af sollys på grund af gunstige astronomiske forhold – havstrømmene kørte op på fuld skrue, og opvarmningen blev forstærket af stigende mængder af drivhusgasser og vanddamp i atmosfæren.

Varm, kold og slukket

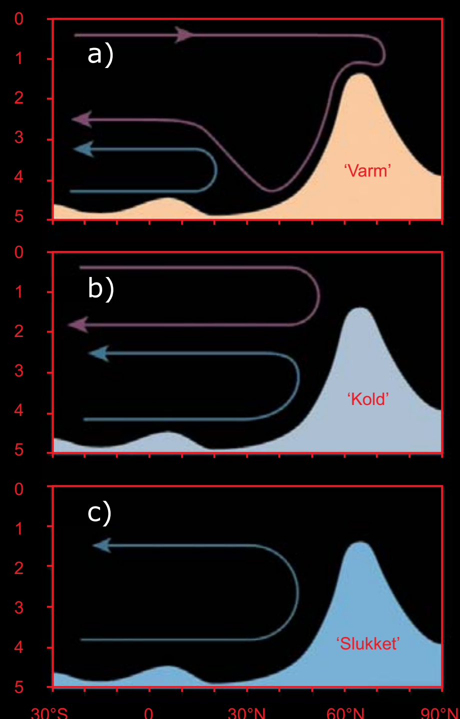
I følge Stefan Rahmstorf fra Universitetet i Potsdam skiftede havcirkulationen i Nordatlanten under sidste istid mellem tre faser: Varm, kold og slukket. Den kolde fase var dominerende, mens de to andre var kortvarige klimasvingninger.

I de varme faser nåede relativt lune overfladestrømme hen over den undersøiske højderyg mellem Grønland og Skotland, og overfladevand sank helt ned til havbunden nord for Island. Havcirkulationen i Nordatlanten var stærk nok til at transportere varme til de nordlige egne og skabe et relativt mildt klima, se figur 1.7a.

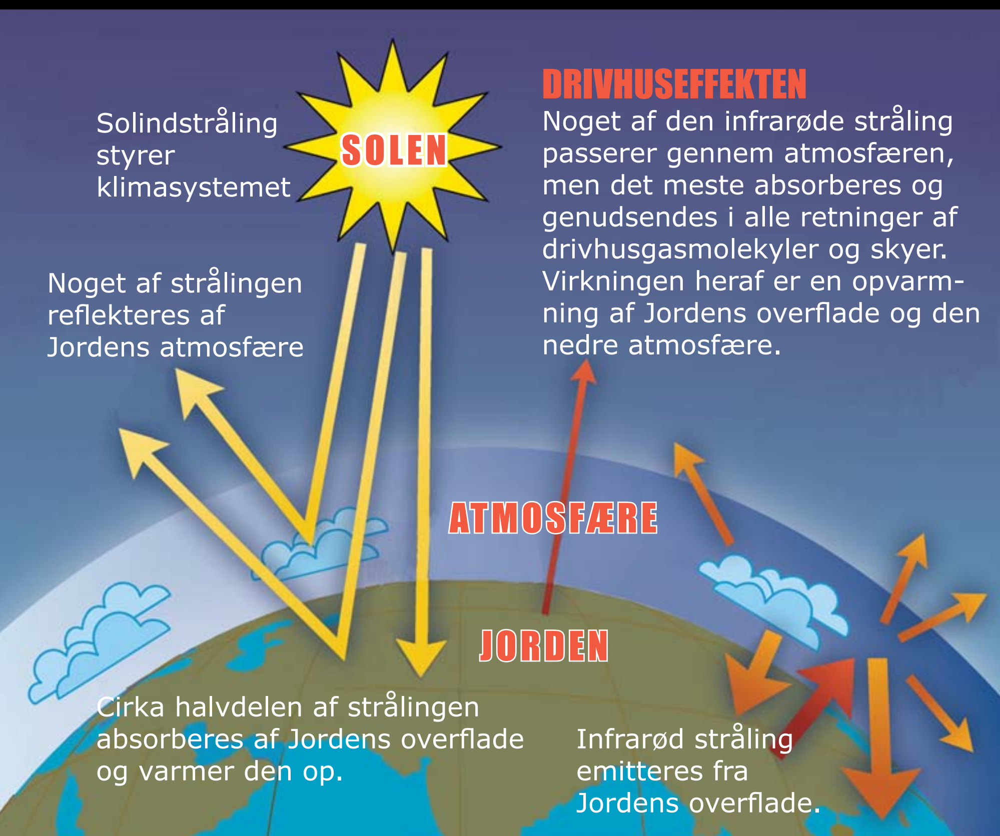
I de kolde faser skete nedsynkningen syd for Island, og ingen overfladestrømme transporterede varme længere mod nord. Derfor voksede iskapperne, og klimaet blev koldere. Overfladevandet i nedsynkningsområdet var ikke salt og tungt nok til, at vandet kunne fortrænge det kolde bundvand fra Sydhavet, se figur 1.7b.

I den slukkede fase standsede overfladestrømmene og nedsynkningen helt, og koldt bundvand fra Antarktis dominerede Atlanterhavet, se figur 1.7c.

Figur 1.7
Tre forskellige cirkulationsmønstre i Nordatlanten gjorde klimaet ustabilt under sidste istid.



Drivhuseffekten gør Jorden beboelig



Figur 1.8
Jorden ville være ubeboelig uden drivhuseffekten. Hvis de vigtigste naturlige drivhusgasser – vanddamp, kuldioxid og metan - ikke fandtes i atmosfæren, ville Jorden være 33 grader koldere end i dag.

Sollyset er relativt kortbølget og kan godt trænge gennem drivhusgasserne og opvarme jordoverfladen. Derimod tilbageholder gasserne langbølget varmestråling fra Jorden. Jo højere koncentrationerne af drivhusgasser er i atmosfæren, jo mindre varme slippes der ud i rummet.

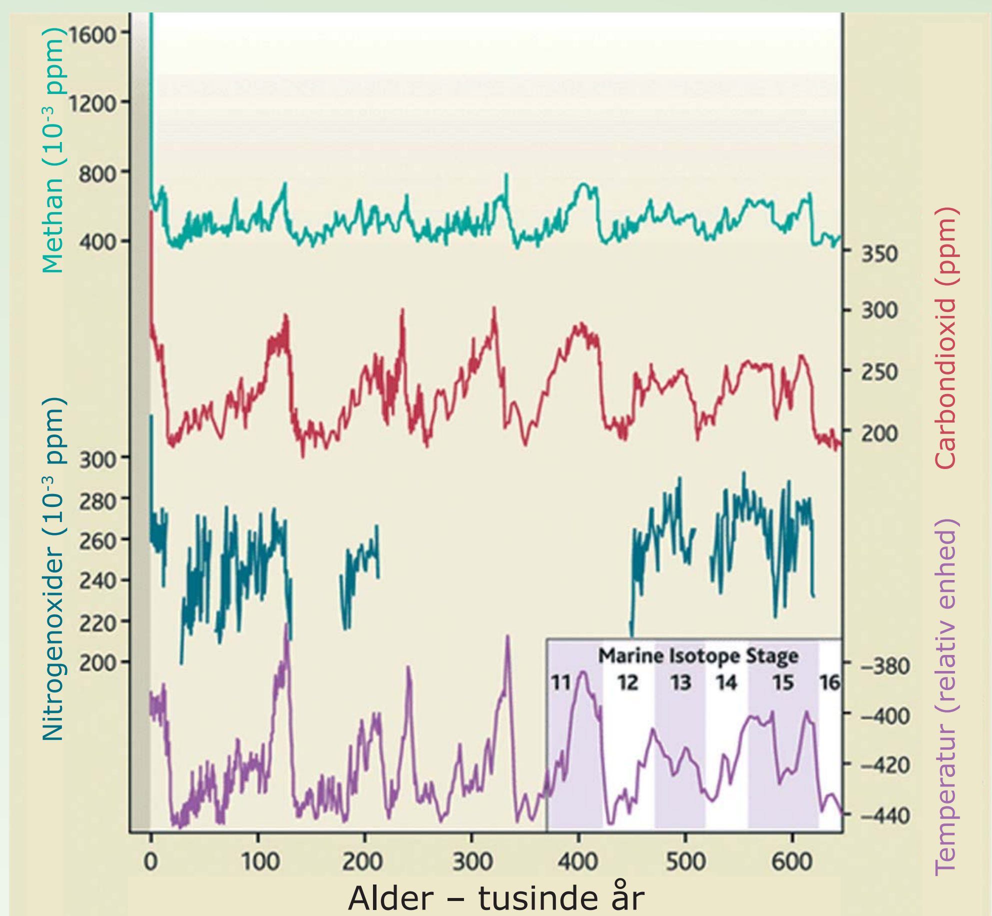
Drivhusgasserne i atmosfæren

Undersøgelser af iskerner fra Antarktis har vist, at mængden af drivhusgasser i atmosfæren stiger, så snart klimaet skifter fra en kold istid til en varm mellemistid. Fænomenet hænger sammen med øget plantevækst og optøning af permafrosne sumpe og moser, for når planter rådner, frigives der kuldioxid eller metan til atmosfæren. Desuden frigives der CO_2 fra havene, fordi varmt vand kan indeholde mindre kuldioxid end koldt vand.

I de seneste otte mellemistider er de atmosfæriske koncentrationer af drivhusgasserne toppet i starten for derefter at falde gradvist og i takt med temperaturen hen imod slutningen. Men i den nuværende mellemistid er der sket noget mærkeligt. Forløbet startede helt normalt, men for 8000 år siden begyndte mængden af CO_2 i atmosfæren igen at stige og nogle årtusinder senere fulgte metanen trop.

Klimamodellerne kan ikke forklare dette fænomen, men William Ruddiman fra University of Virginia i USA har en kontroversiel teori; nemlig at menneskene allerede på det tidspunkt ændrede Jordens klima. For 8000 år siden fik opfindelsen af agerbruget vore forfædre til at rydde skov fra Europa til Asien, hvilket frigav store mængder kuldioxid til atmosfæren, og for 5000 år siden begyndte folkeslagene i Sydøstasien at oversvømme deres rismarker og skabte enorme, kunstige vådområder, hvorfra der ved gæringsprocesser frigives metan. De fleste klimaforskere vurderer imidlertid, at mængderne af frigivne drivhusgasser som følge af skovrydning og risdyrkning var for beskedne til at forklare den mystiske stigning af kuldioxid og metan i atmosfæren.

Derimod er der ingen tvivl om, at afbrændingen af kul, olie og naturgas gennem de seneste århundreder har øget mængden af drivhusgasser i atmosfæren dramatisk. Faktisk viser analyser af iskerner fra Antarktis, at de atmosfæriske koncentrationer af drivhusgasser nu er højere end nogensinde gennem de seneste 650.000 år!



Figur 1.9
Analyser af EPICA iskernen fra Dome C på Østantarktis viser, at de primære drivhusgasser i atmosfæren – kuldioxid, metan og kvælstofilter – har svinget i takt med temperaturen gennem de seneste 650.000 år.



Naturens klimaarkiver

For at kunne forudsige fremtidens klima og være i stand til at skelne mellem naturlige og menneskeskabte klimaændringer er det nødvendigt at forstå klimaets svingninger langt tilbage i tiden.

Jordens klima varierer af naturlige årsager, og det er ekstremt svært at skelne mellem naturlige og menneskeskabte klimaændringer. For overhovedet at have en chance må man have nøje kendskab til Jordens naturlige klimasvingninger langt tilbage i tiden.

Her slår de knap 150 år, hvor vi har målt de globale temperaturer, slet ikke til. For klimaet skifter ikke blot fra år til år og fra årti til årti, men over hundreder, tusinder og hundredetusinder af år.

Når det gælder drivhusgasserne i atmosfæren, rækker de direkte målinger kun tilbage til 1958, hvor den amerikanske klimaforsker Charles Keeling fik opstillet målesystemer på Hawaii og Antarktis. Ved at måle langt væk fra lokale kilder til CO_2–udslip er det muligt at bestemme de globale baggrundsniveauer af kuldioxid i atmosfæren. Da målingerne startede, var den atmosfæriske koncentration af CO_2 på 315 ppmv – 315 milliontedele af atmosfærens volumen – mens den nu er steget til 384 ppmv.

De direkte målinger er alt for kortvarige til at beskrive Jordens klimasystem, og derfor undersøger klimaforskerne naturlige klimaarkiver som træringe, iskerner, koraller, søsedimenter og havbundskerner. På den måde er det lykkedes at rekonstruere klimaets udvikling langt tilbage i tiden.

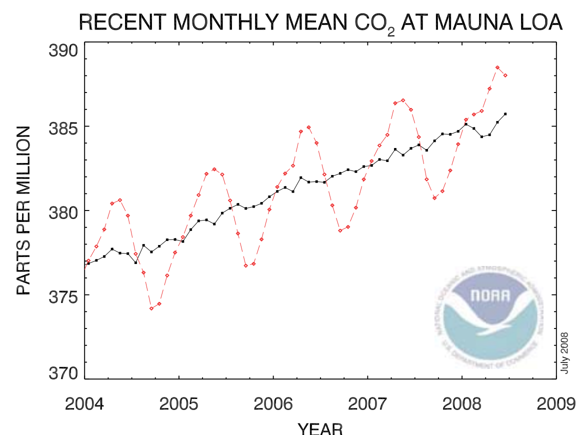
De tilgængelige data om Jordens klima – nu og i fortiden – er udgangspunktet for de klimamodeller, der bruges til at forudsige fremtidens klima. Klimamodellerne simulerer samspillet mellem atmosfæren, oceanerne, landjorden og isen ud fra basale fysiske og kemiske love.

Hvis vi skal kunne tro på klimamodellernes forudsigelser om fremtiden, er kravet, at modellerne skal kunne reproducere fortiden med en høj grad af træfsikkerhed. Heldigvis bliver klimamodellerne bedre og bedre.

Figur 2.1
Iskerner fra de store iskapper er unikke klimaarkiver, som kan afsløre fortidens lufttemperaturer og koncentrationer af drivhusgasser i atmosfæren.



Figur 2.2
CO_2–observatoriet på Mauna Loa på Hawaii.



Figur 2.3
Resultaterne af de seneste års målinger på CO_2–observatoriet på Mauna Loa.

Træringe fortæller om nedbør og sommertemperatur

Træringe er et fantastisk detaljeret klimaarkiv. Væksten starter om foråret, hvor der som regel er rigeligt med vand, og derfor er de første nye celler i årlaget store. I takt med, at sommeren skrider frem, bliver de nye celler mindre og mindre, indtil væksten standser om efteråret.

Tykkelsen af en årring afhænger især af nedbøren, men den påvirkes også af sommertemperaturen, og derfor viser ringene i en træstamme, hvordan klimaet har varieret gennem træets levetid. Mange træer lever i flere hundrede år, og verdens længst levende træer er børstekoglefyr i USA, som kan blive 5000 år gamle.

Et levende træ dateres ud fra en boreprøve i stammen eller ved at fælde træet og tælle årringene. For at komme længere tilbage i tiden er det nødvendigt indsamle dødt træ og etablere en kronologi af overlappende sekvenser.

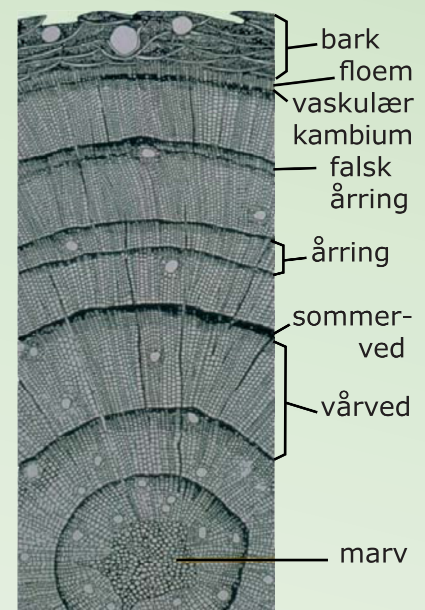
Her starter man en prøve fra et levende træ, som man sammenligner med en prøve fra en stub af et træ, som længe har været dødt. Fidusen er at finde et sted, hvor nogle af de ældste årringe i det levende træ matcher med nogle af de yngste årringe i den døde stub. Så har man et anker i fortiden og kan tælle videre tilbage gennem årringene i stubben. Hvis man på egnen kan finde endnu ældre dødt træ, der matcher med de yngste årringe i træstubben, får man et nyt anker, så man kan tælle sig endnu flere år bagud i tiden.

Den længste sammenhængende kronologi af overlappende træringe er fra Tyskland, og den viser klimaets udvikling år for år tilbage til afslutningen af sidste istid for 11.700 år siden.

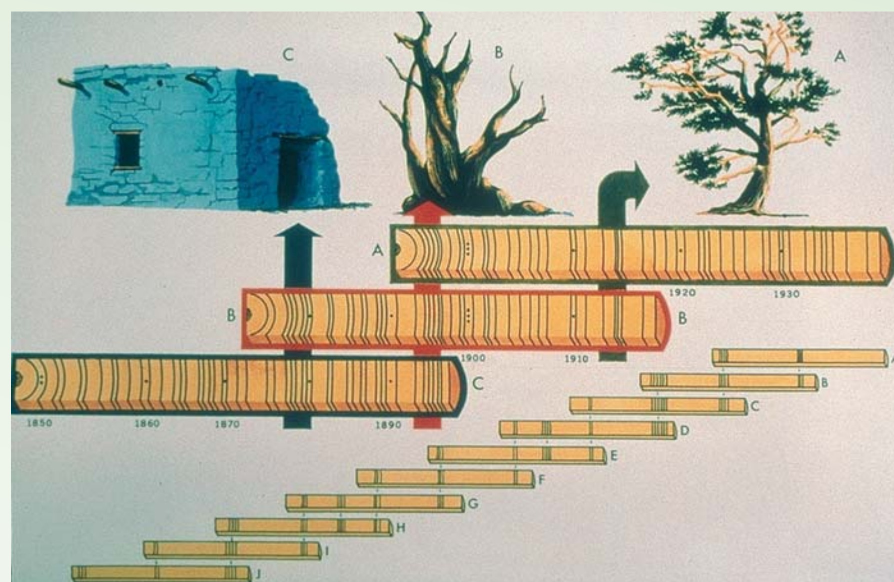


Figur 2.4
Børstekoglefyr lever i årtusinder.

Tværsnit i nåletræ



Figur 2.5
Vækstringene i træer viser nedbøren og sommertemperaturen år for år.



Figur 2.6
Princippet i en kronologi baseret på overlappende sekvenser af træringe.

Koraller viser havtemperatur og vandstand

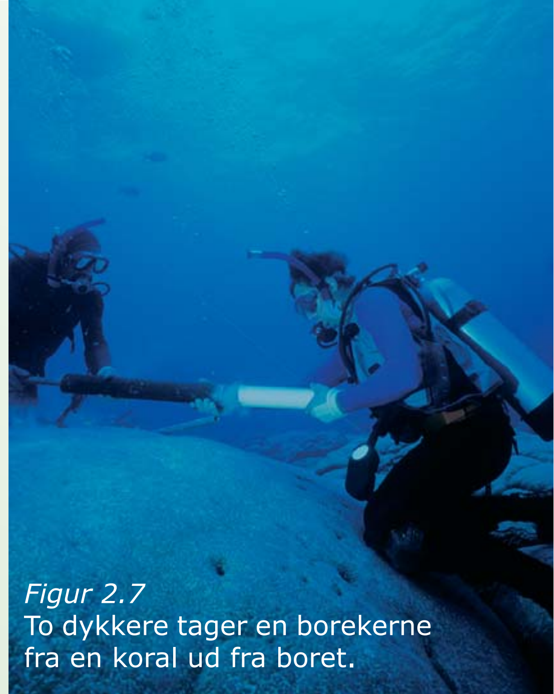
Koraller lever i op til 400 år, og de reagerer så hurtigt på ændringer i havtemperaturen, at klimavariationer kan følges måned for måned tilbage i tiden.

Koraller har et skelet af calcium karbonat, og den del af skelettet, der dannes om vinteren, har en anden massefylde, end den del af skelettet, der dannes om sommeren. Derfor har koraller årlige vækstringe, som kan bruges til datering.

Koraller er et fintfølende barometer for havvandets temperatur nær overfladen. Når klimaet skal følges tilbage i tiden, udborer dykkere prøver fra koraller. Ved analyserne af borekernerne bestemmes havvandets temperatur i fortiden ved at måle af forholdet mellem to slags ilt i korallerne; almindelig ilt (^{16}O) og en tung iltisotop (^{18}O) med to ekstra neutroner i atomkernen. Der er mere af den tunge isotop i havvandet i de perioder, hvor vandet er koldt, end når det er varmt. Det skyldes, at det kræver mere varme at fordampe vandmolekyler med tung ilt end vandmolekyler med almindelig ilt.

Ved at undersøge døde, forstenede koraller er det lykkedes at skaffe oplysninger om vandstanden i verdenshavene i forskellige perioder helt tilbage til for 130.000 år siden, hvor verden lige som i dag oplevede en varm mellemistid.

Forstenede koraller kan bruges som et mål for fortidens havvandstand, fordi de fleste arter vokser på lavt vand nær kysterne. Når forstenede rev ligger højere eller lavere end de nuværende rev, viser det vandstandens bevægelser over tid. Studier af forstenede koraller har vist, at havvandstanden i sidste istid var 130 meter lavere end i dag.


Figur 2.7
To dykkere tager en borekerne fra en koral ud fra boret.


Figur 2.8
Koral fra Galápagos Øerne. De sorte linier repræsenterer årlige vækstringe, mens de blå og røde linier viser årstiderne.

Iskerner – lufttemperatur og atmosfærekemi

Iskerner fra Grønland og Antarktis er unikke klimaarkiver. Når sneen falder på iskapperne, rummer den oplysninger om luftens temperatur. År for år dækkes isen af nye lag af sne, og de ældre lag presses sammen, omdannes til is og synker ned gennem iskappen. Det fantastiske er, at hvert eneste årlag bevarer oplysningerne om klimaet fra dengang, isen dalede ned som sne på iskappens top.

Klimaarkivet i Jordens store iskapper åbnes ved at udbore kerner ned til bunden. Derpå dateres isen tilbage i tiden ved at tælle årlag i iskernen. Der er flere metoder til at skelne årlagene, fx er der mere syre i den sne, der falder om sommeren end om vinteren. Danske glaciologer har talt de enkelte årlag i de grønlandske iskerner 60.000 år tilbage i tiden.

Længere nede i iskernen er dateringen baseret på beregninger af, hvor meget de enkelte årlag strækkes og ud-


Figur 2.9
Borearbejde ved Nord–GRIP.



Figur 2.9
Nord–GRIP lejren, hvor den seneste Grønlandske iskerne blev udboret.

tyndes, når de bevæger sig ned gennem iskappen. Den grønlandske iskerne, Nord–GRIP, rækker 123.000 år tilbage i tiden, mens EPICA iskernen fra Dome C på Østantarktis rummer oplysninger om klimaet gennem 900.000 år. Til gengæld er tidsopløsningen ikke nær så god som i iskernerne fra Grønland, fordi nedbøren på Antarktis er langt mindre og årlagene derfor tyndere.

Fortidens temperatur bestemmes gennem målinger af forholdet mellem almindelig is og tung is i iskappen. Vandmolekylerne i den almindelige is indeholder almindelig ilt (^{16}O), mens vandmolekylerne i tung is indeholder den tunge iltisotop (^{18}O).

Når skyerne fra havet syd for Grønland stiger højt til vejrs og flyver ind over Indlandsisen, falder deres temperatur. Så afgiver skyerne nedbør, fordi den mængde vand, en sky kan indeholde, formindskes, når den afkøles. Jo koldere luften er, jo mere sne har skyen tabt, inden den kommer ind til midten af iskappen, hvor iskernerne udbores.

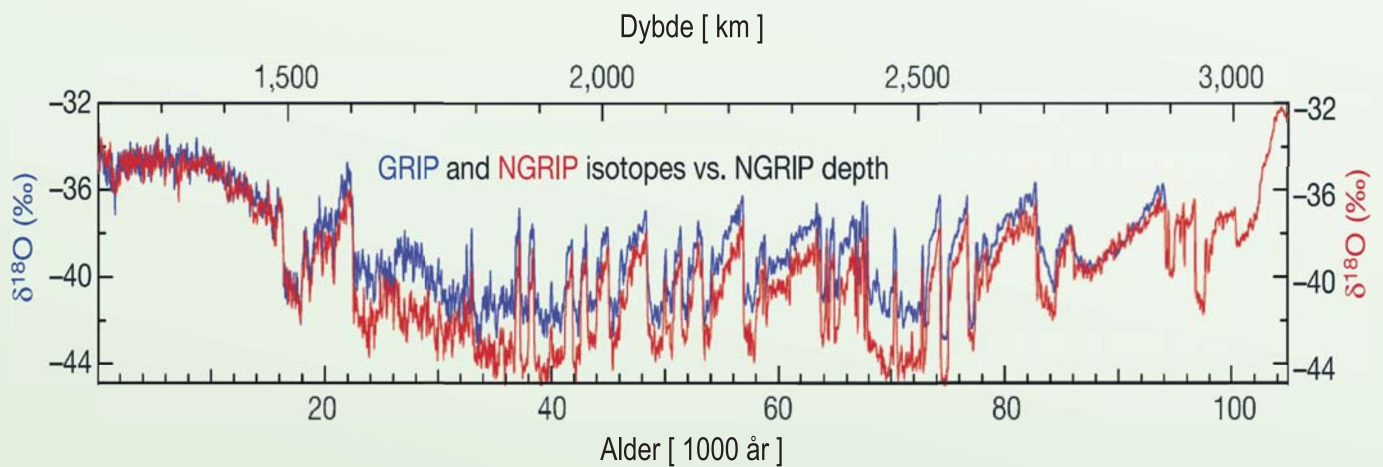
Og nu kommer det smarte. De sjældne og tunge vandmolekyler falder hurtigere ud af skyen end almindeligt vand – ganske enkelt fordi molekylerne er tungere. Så jo mere skyen afkøles på rejsen hen over Indlandsisen, jo mere vand mister den undervejs, og jo mindre tungt vand er der tilbage i den sne, som falder midt inde på iskappen. Derfor fortæller forholdet mellem let og tung ilt i isen om skyens og dermed luftens temperatur, da sneen faldt på iskappens top.

Iskerner fortæller også om atmosfærens kemiske sammensætning, fordi isen rummer luftbobler, som indeholder prøver af fortidens luft. Ved analyser af iskerner fra Antarktis er det lykkedes at påvise de atmosfæriske koncentrationer af drivhusgasserne CO_2, metan og kvælstofilter gennem de seneste 650.000 år.

Et stykke nede i iskernerne fra Antarktis er den tidsmæssige usikkerhed i målingerne på 2000 år, men hvis det lykkes at måle CO_2–indholdet i de grønlandske isker-



Figur 2.11
Borehallen og laboratorierne er gravet ned under isen, hvor glaciologerne kan arbejde i ly for vind og vejr.



ner, kan usikkerheden nedbringes til 20 år, fordi årlagene er tykkere og den tidsmæssige opløsning bedre. Det kan måske løse gåden om, hvorfor mængden af kuldioxid og metan begyndte at stige for 8000 og 5000 år siden – længe før, mennesket gik i gang med at afbrænde olie, kul og gas.

Figur 2.12
Klimakurverne fra de grønlandske iskerner GRIP og Nord–GRIP.

Fortidens planter og klimaet

Pollen fra træer og planter er gode indikatorer for vegetationens sammensætning på et sted, og forandringer er ofte et resultat af klimaændringer. Hvis man fx finder fossile pollen fra løvtræer i et område, som i dag er frossen tundra, ved man, at klimaet engang var meget varmere. Fortidens plantevækst fortæller også, om klimaet har været fugtigt eller tørt.

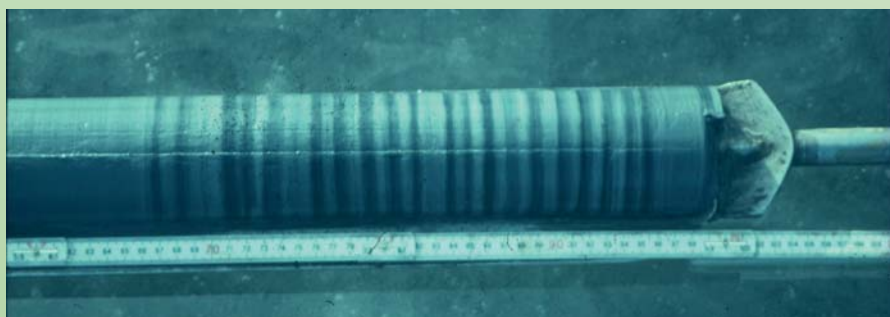
Pollenkorn er særdeles modstandsdygtige overfor nedbrydning, især når de ender i iltfrie aflejringer på bunden af søer eller moser, hvor de kan bevares gennem årtusinder. Fossile pollen kan være millioner år gamle.



Figur 2.13
Pollen i aflejringer på bunden af søer fortæller om fortidens plantevækst og derigennem om klimaet.

Klimaarkivet i en sø åbnes ved at bore en kerne ned gennem aflejringerne på bunden. I laboratoriet dateres lagene i kernen normalt ved hjælp af kulstof–14 metoden, som rækker 50.000 år tilbage i tiden. Den tidsmæssige opløsning i borekernen afhænger af sedimentationshastigheden; i nogle tilfælde kan man skelne mellem enkelte årstider.

Næste trin er at identificere pollenkornene ned gennem borekernen ved at studere dem i et mikroskop. På den måde bestemmes skiftende plantevækst tilbage i tiden. I Frankrig er det lykkedes at udbore søbundskerner, som indeholder kontinuerte tidsserier af pollen, som viser klimaets udvikling gennem de seneste 140.000 år.



Figur 2.14
Borekerne fra en svensk sø.

Havbundskerner rækker langt tilbage i tiden

Den ældste havbund på Jorden er omkring 180 millioner år gammel, og nogle steder i verden kan borekerner fra aflejringer på havbunden vise klimaets udvikling gennem hele perioden.

Sedimenterne på havbunden indeholder et væld af oplysninger om fortidens klima: Havvandets temperatur og saltholdighed, vandstanden i oceanerne, og ændringer i de globale havstrømme tilbage i tiden.

Havbundskerner har sjældent en så fin tidslig opløsning som naturens klimaarkiver på land, og de enkelte sedimentlag spænder typisk over hundreder eller tusinder af år. Til gengæld byder kernerne fra havbunden på en kontinuert registrering af klimaet gennem mange millioner år.

Forskerne bruger især fossiler af mikroskopiske dyr – foraminiferer – til at bestemme, hvordan havvandets temperatur og klimaet har ændret sig gennem tiderne.

Foraminiferer er omgivet af en kalkskal. Når dyrene dør, synker de til bunds og aflejres på havbunden, og her forstenes kalkskallerne med tiden. De fossile kalkskaller er en slags termometer, der viser, hvor varmt eller koldt havvandet var, da de små dyr levede.

Det skyldes, at kalkskallerne er i kemisk ligevægt med havvandet, og det afspejles i deres indhold af lette og tunge iltisotoper. Havvand indeholder både almindelig og tung ilt, og forholdet mellem de lette og de tunge vandmolekyler varierer med klimaet.

Når havvand fordamper fra havets overflade, fordamper lette vandmolekyler med almindelig ilt nemmere end vandmolekyler med den sjældne, tunge iltisotop. I en varm mellemistid falder det fordampede havvand ned som regn og ender igen i havene enten direkte eller via floder, og derfor er forholdet mellem lette og tunge vandmolekyler i havene rimeligt konstant.

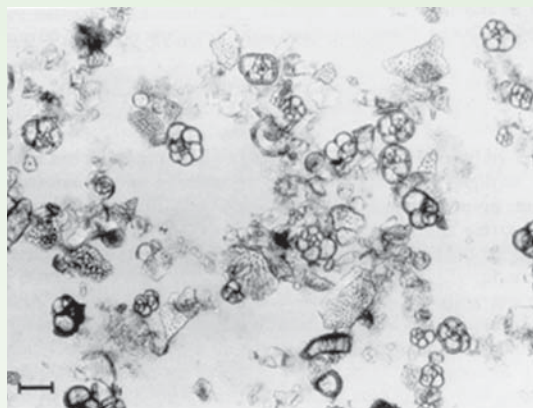
Men under en istid bindes en stor del af nedbøren i iskapper på land. Da det især er de almindelige, lette vandmolekyler, som fordamper fra havoverfladen, bliver der forholdsvis flere tunge vandmolekyler i havet, og det kan aflæses i foraminiferernes kalkskaller. Studier af havbundskerner har kortlagt skiftene mellem istider og mellemistider gennem de seneste 2,75 millioner år.





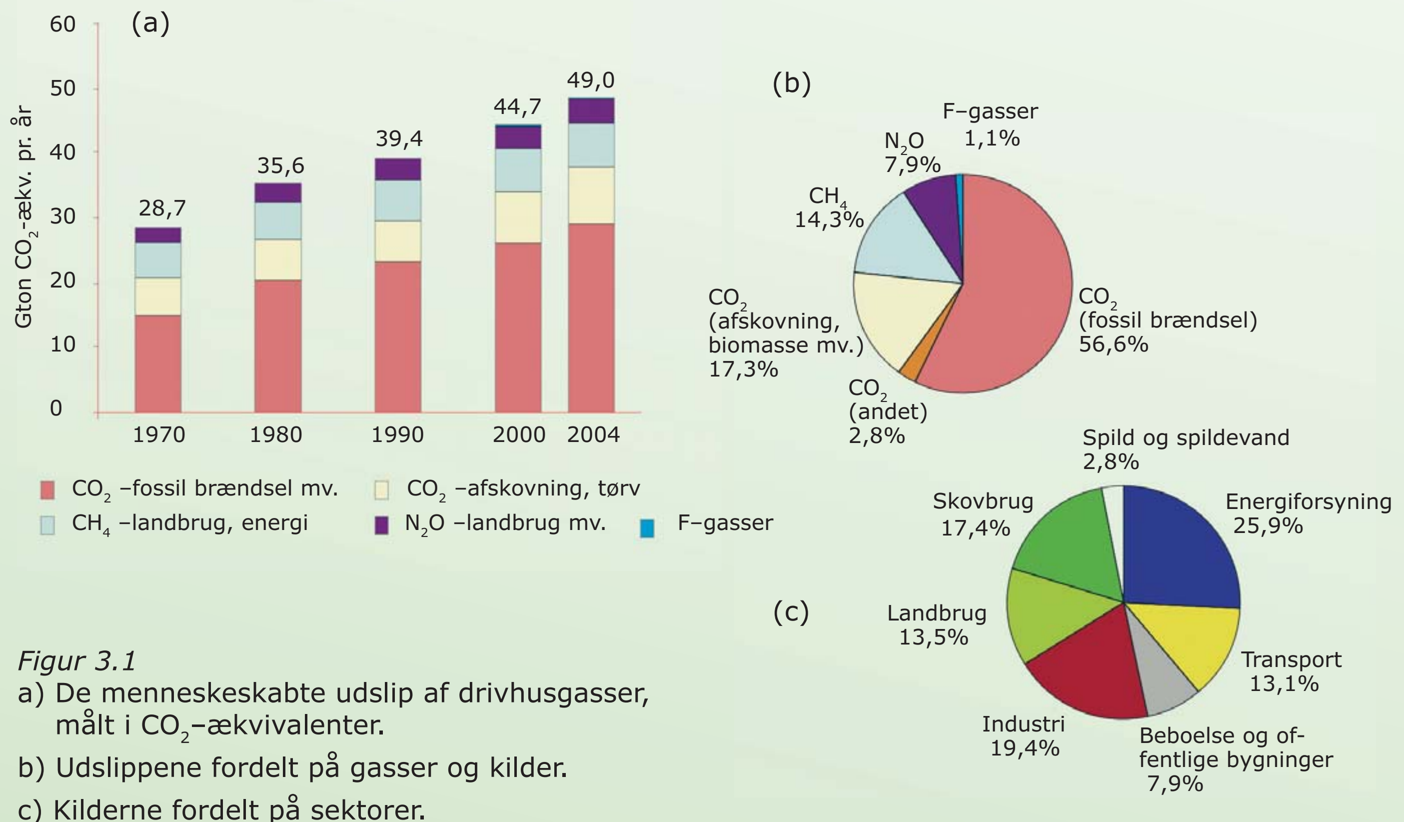
Figur 2.15
Havbundskerner udbores især i projektet *'International Ocean Drilling Programme'*, som Danmark deltager i. Her ses de to boreskibe – øverst veteranen *Joides Resolution*, nederst det nye japanske boreskib *Chikyo*.

Figur 2.16
Der findes to grupper af foraminiferer. Til venstre ses foraminiferer, der lever ved havoverfladen, og til højre ses foraminiferer, som lever på havbunden.





Den menneskeskabte drivhuseffekt



Figur 3.1

a) De menneskeskabte udslip af drivhusgasser, målt i CO_2–ækvivalenter.

b) Udslippene fordelt på gasser og kilder.

c) Kilderne fordelt på sektorer.

FN's klimapanel, IPCC, konkluderede i 2007, at der er 90 procents sikkerhed for, at den igangværende opvarmning af Jorden skyldes menneskeskabte udslip af drivhusgasser.

I 1832 var den atmosfæriske koncentration af den primære drivhusgas kuldioxid ifølge data fra iskerner på 284 ppmv. Nu er koncentrationen steget til 384 ppmv; en vækst på 35 procent over blot 175 år!

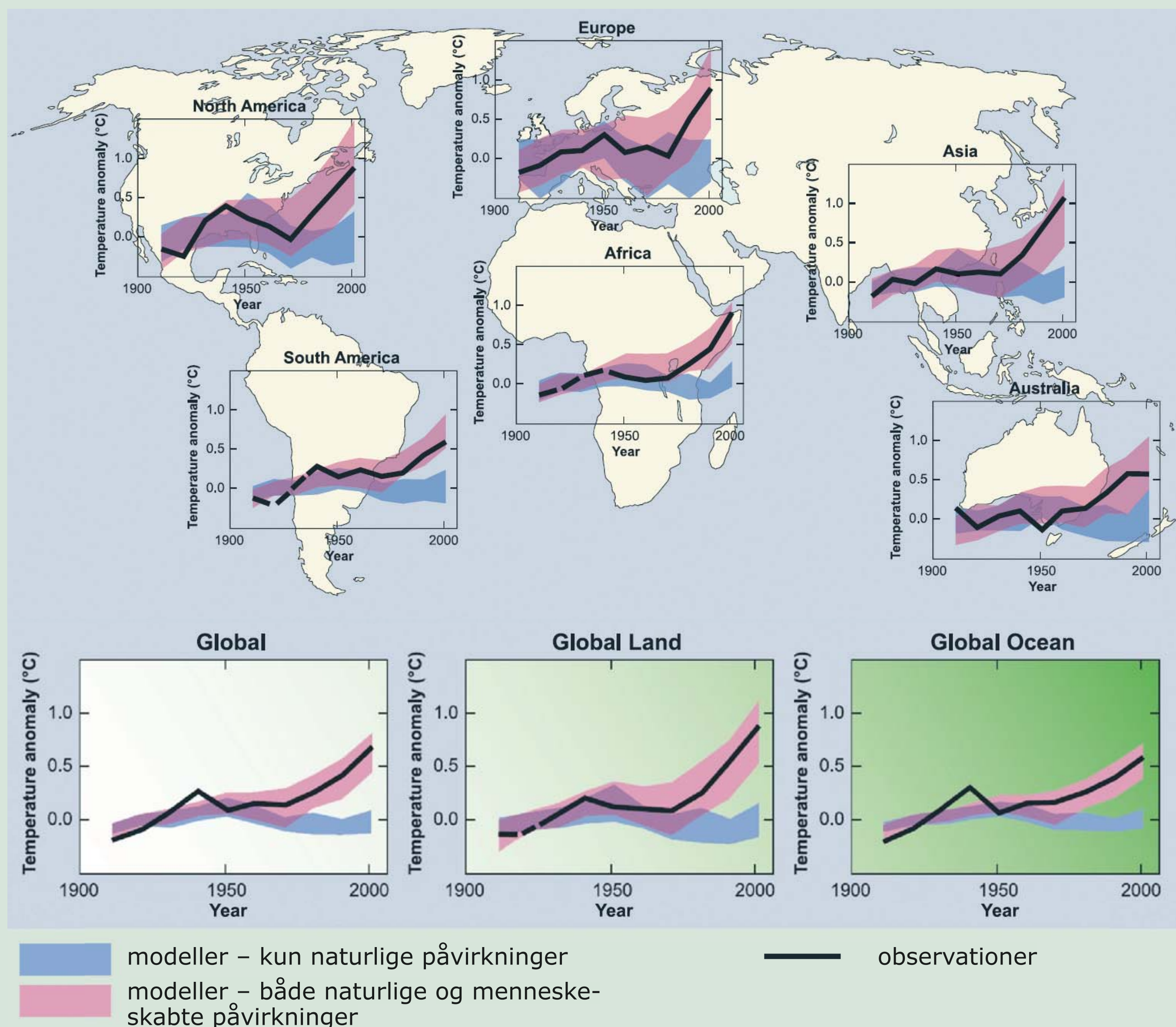
Årsagen er de menneskeskabte udledninger af drivhusgasser, som først og fremmest skyldes afbrænding af fossile brændstoffer. Udslippene er især vokset eksplosivt i de senere årtier. I følge FN's klimapanel, IPCC, steg de årlige udslip med 70 procent mellem 1970 og 2004, og udviklingen fortsætter.

Konsekvenserne mærker vi allerede nu. IPCC konkluderer, at der nu er 90 procents sikkerhed for, at de menneskeskabte udslip af drivhusgasser er årsag til den igangværende opvarmning af Jorden.

Opvarmningen af Jorden

Siden 1906 er den globale middeltemperatur steget med 0,74 grader, og 11 af de seneste 12 år er blandt de varmeste, der er blevet registreret, siden de globale temperaturmålinger startede i 1860. På den nordlige halvkugle har de sidste fem årtier sandsynligvis været varmere end nogensinde gennem de seneste 1300 år. Opvarmningen er slået kraftigst igennem i de følsomme arktiske områder, hvor temperaturstigningerne er dobbelt så store som gennemsnittet for resten af kloden.

Den globale opvarmning begynder nu at ændre forholdene på Jorden. Vandstanden i verdenshavene er steget med 1,8 mm om året siden 1961 som følge af termisk udvidelse og smeltende gletschere og iskapper. De sne– og isdækkede områder på Jorden svinder ind. Der er blevet flere ekstremt varme dage og nætter og færre kolde, og antallet af episoder med voldsom regn er øget. Nedbørsmønstrene har ændret sig, så der falder mere regn i

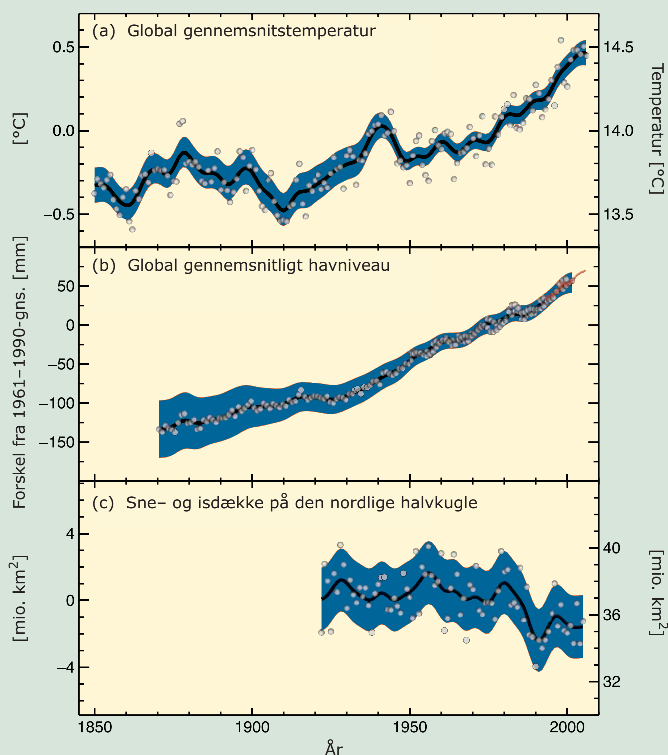


Figur 3.2
Klimamodellernes beregninger over de globale temperaturstigninger gennem det seneste århundrede.

Sort streg: Den observerede opvarmning.

Blå: Modelberegninger startende i år 1900, hvor der ikke tages højde for menneskeskabte drivkræfter, men kun for klimasystemets naturlige drivkræfter.

Rød: Modelberegninger for samme periode, som indbefatter både naturlige og menneskeskabte drivkræfter.

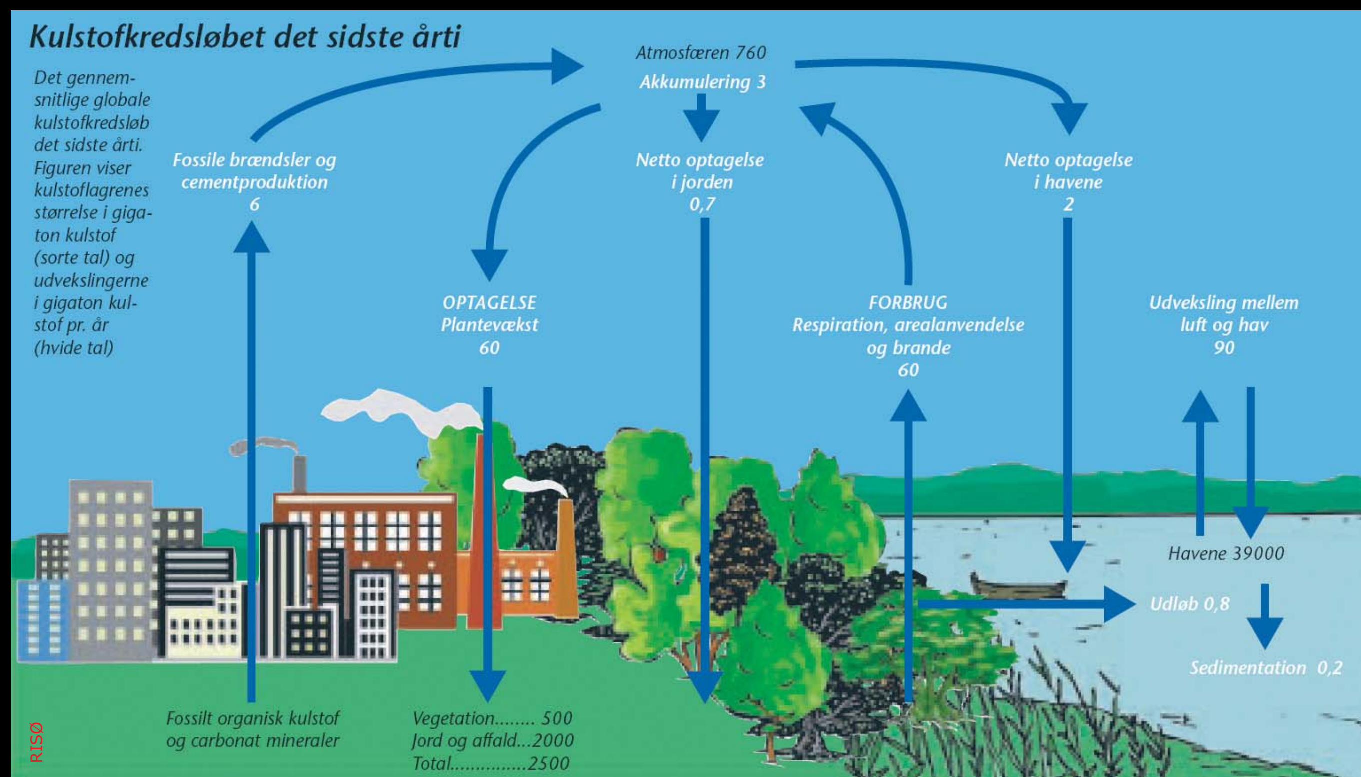


Figur 3.3
a) Udviklingen i den globale gennemsnitstemperatur.

b) Vandstanden i verdenshavene.

c) Snedækkede og isdækkede områder på den nordlige halvkugle. Cirklerne viser målte årsværdier. Den sorte streg angiver de gennemsnitlige temperaturer over tiårige perioder, mens de blå felter viser intervallet for usikkerheden i målingerne.

Vi flytter kulstof fra jordskorpen til atmosfæren



Liden tue kan vælte stort læs, og det samme kan man sige om den menneskeskabte drivhuseffekt. For den mængde CO_2 vi hvert år udleder til atmosfæren er ti gange mindre end den mængde af drivhusgassen, som indgår i planternes kulstofomsætning, og 15 gange mindre end den naturlige udveksling af kuldioxid mellem havene og atmosfæren. Men der er en afgørende forskel, og nøgleordet er balance.

Planter og træer optager CO_2 via fotosyntesen og frigiver en tilsvarende mængde af gassen igen, når planterne dør og rådner. På samme måde er der balance i udvekslingen af kuldioxid mellem havene og atmosfæren.

De menneskeskabte CO_2–udslip skaber ubalance i systemet, fordi vi via afbrænding af fossile brændstoffer flytter kulstof fra undergrunden til atmosfæren.

Halvdelen af de årlige udslip ender i havene eller oplagres i landjorden. Den anden halvdel akkumuleres i atmosfæren og er årsag til de stadigt stigende atmosfæriske koncentrationer af drivhusgasser og dermed for den menneskeskabte drivhuseffekt.

Figur 3.4
Det naturlige kulstofkredsløb er i balance. Men ligevægten forrykkes, når vi afbrænder kul, olie og gas og flytter kulstof fra jordskorpen til atmosfæren. De sorte tal viser størrelsen af kulstoflagrene på land, i havene og i atmosfæren, mens de hvide tal angiver udvekslingerne. Alle tal i gigaton.

de østlige dele af Nord– og Sydamerika, Nordeuropa og de nordlige og centrale dele af Asien, mens nedbøren er reduceret i det sydlige Afrika og det sydlige Asien. Sandsynligvis vokser de tørkeramte arealer på Jorden. Samtidig har opvarmningen af havoverfladen ifølge flere analyser øget styrken af de værste tropiske orkaner i Nordatlanten.

Hvordan kan klimaforskerne være sikre på, at klimaændringerne ikke blot skyldes deres naturlige udsving? Det stærkeste bevis kommer fra klimamodellerne, som er ude af stand til at reproducere de sidste hundrede års udvikling uden at indregne de menneskeskabte udslip af drivhusgasser.

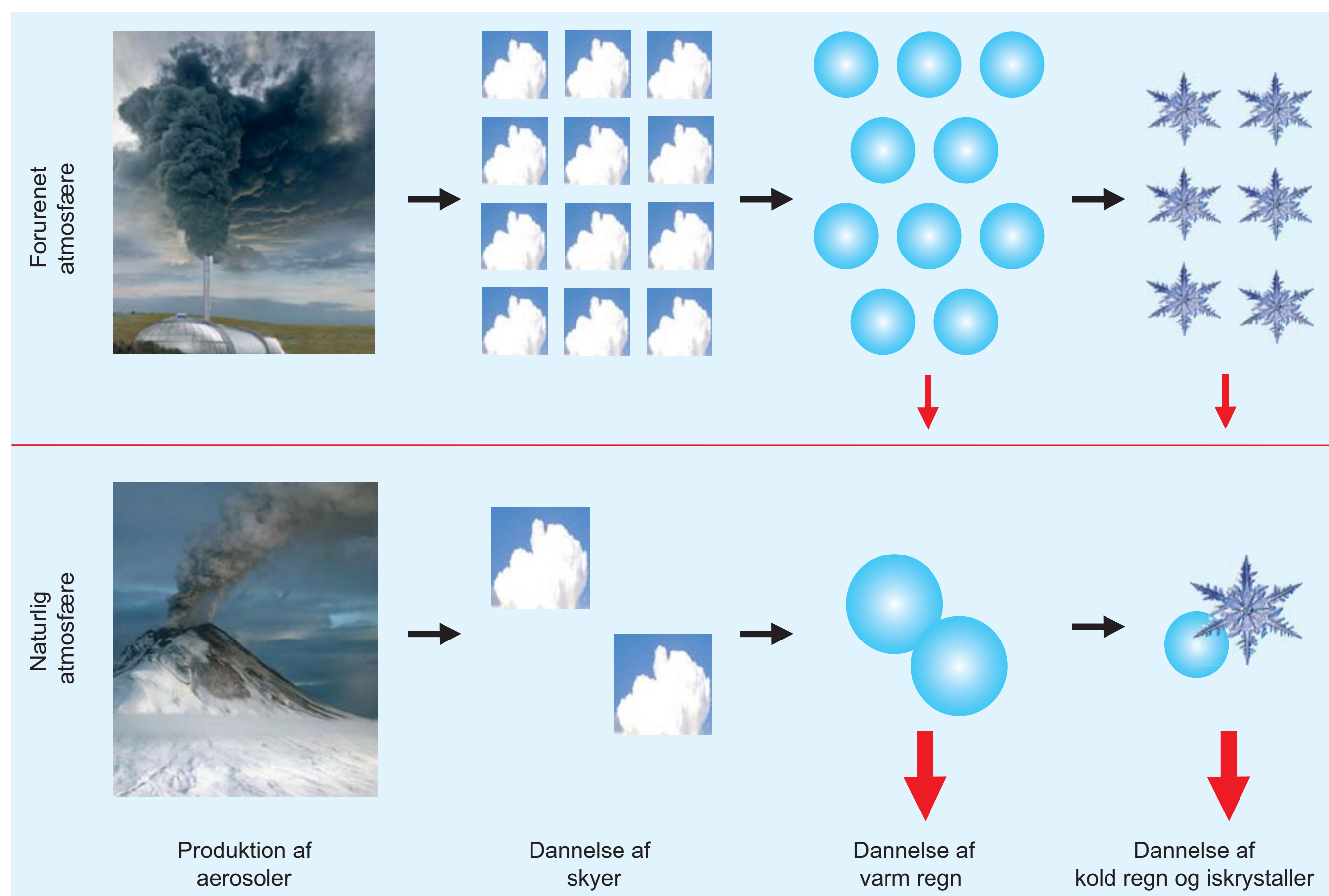
Eller sagt på en anden måde: De naturlige drivkræfter i klimasystemet er simpelt hen ikke stærke nok til at forklare opvarmningen og de observerede klimaændringer.

Luftforurening – jokeren i klimaspillet

Klimamodellerne er blevet klart forbedret i de senere år, men der er stadig usikkerheder, fordi forståelsen af Jordens komplekse klimasystem langt fra er fuldstændig. En af de største jokere i spillet er luftforurening med aerosoler; dvs. små partikler.

Aerosoler afkøler Jorden direkte ved at reflektere sollys ud i rummet og indirekte via deres samspil med skyer, hvor aerosolerne fungerer som sædekorn for dråber. Jo flere partikler, der findes i en sky, jo flere og mindre dråber dannes der, og jo mere stråling reflekterer skyen. Derfor køler beskidte skyer mere end rene skyer. Samtidig er forurenede skyer mindre tilbøjelige til at falde ned som regn, fordi de små dråber har svært ved at blive samlet i store regndråber. Konsekvensen er mere afkøling, fordi øget skydække i forurenede regioner hindrer sollys

Figur 3.5
Små partikler i luftforurening påvirker skyer, fordi de fungerer som sædekorn for dråber. Forurenede skyer indeholder op til 8 gange flere små dråber end rene skyer og reflekterer derfor mere sollys ud i rummet. De mange små dråber betyder også, at skyerne er mindre tilbøjelige til at falde ned som regn, fordi små dråber har svært ved at blive samlet i store regndråber. Konsekvensen er, at forurenede skyer afkøler klimaet.



i at nå ned til jordoverfladen. Omvendt opvarmer nogle aerosoler som fx sod atmosfæren, fordi partiklerne absorberer sollys. Totalt set er der næppe tvivl om, at luftforurening med aerosoler afkøler Jorden og modvirker drivhuseffekten. Det afgørende spørgsmål er: Hvor meget?

I dag er der rimelig enighed om, at den menneskeskabte drivhuseffekt opvarmer jordoverfladen med omkring 2,4 watt pr. kvadratmeter, mens IPCC's bud på aerosolernes afkølende effekter er 1,2 watt pr. kvadratmeter; altså en afkøling svarende til halvdelen af opvarmningen. IPCC erkender dog i sin nye rapport, at estimatet er behæftet med en betydelig usikkerhed.

Det bliver mere og mere vigtigt at få kvantificeret aerosolernes afkøling af kloden; paradoksalt nok fordi luften bliver renere på globalt plan. Fra 1960–1990 steg luftforureningen med aerosoler, og det formindskede mængden af sollys ved jordoverfladen, men nu stiger solindstrålingen igen ikke blot i Europa, Nordamerika, Rusland og Japan, men også i Kina, hvor det er lykkedes at holde luftforureningen rimeligt i ave på trods af den hastige industrialisering. På den baggrund peger flere klimaforskere på, at renere luft i fremtiden kan medføre øget opvarmning frem mod år 2100. Igen er det afgørende spørgsmål: Hvor meget?

Sagen er nemlig, at det er ekstremt vanskeligt at kvantificere aerosolers indirekte klimabidrag. For det første er aerosoler fysisk og kemisk meget forskellige og spænder fra små sulfatmolekyler til store partikler som sod, sand og aske; en størrelsesforskel, der svarer til forholdet mellem tennisbolde og planeter. For det andet fordeles partiklerne ikke jævnt i atmosfæren som drivhusgasserne, og koncentrationerne skifter hele tiden på lokalt og regionalt plan på grund af varierende udslip og foranderligt vejr. For det tredie er det uhyre svært at modellere de forskellige aerosolers vertikale fordeling i atmosfæren og dermed bestemme deres påvirkning af dråbedannelsen i skyerne.

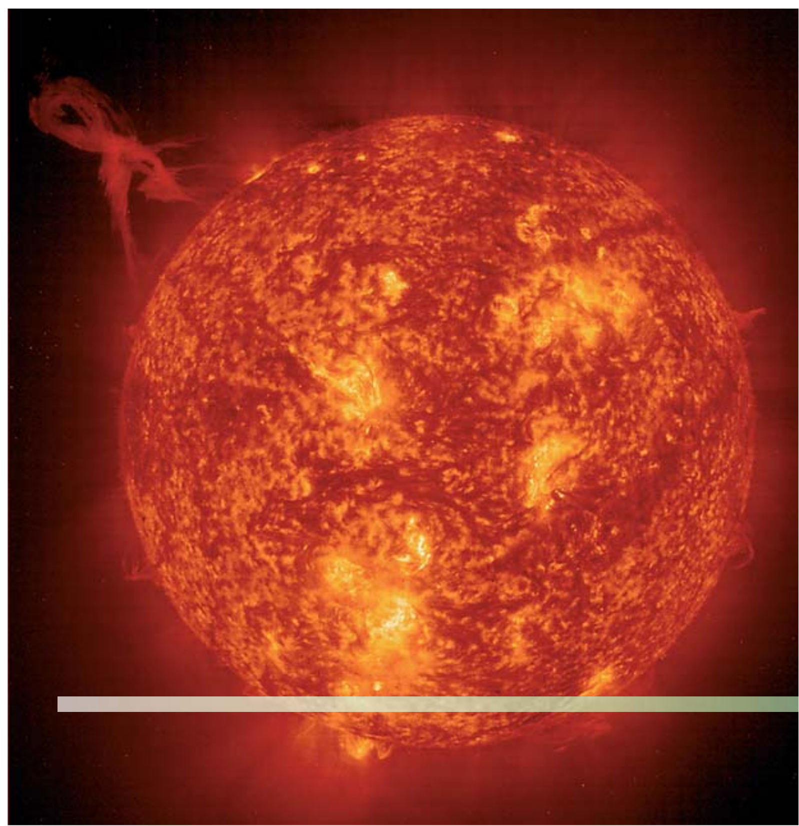
To nye satellitter, Cloudsat og Calipso, som USA og Frankrig opsendte i 2006, kan forhåbentlig forsyne klimaforskerne med et detaljeret globalt datasæt, der kan reducere usikkerheden omkring aerosolernes klimabidrag. Cloudsat bestemmer ved hjælp af radarbølger højden af skyernes top og bund, skelner mellem skyernes forskellige lag, aflæser forholdet mellem is og vand i skyerne og måler nedbøren. Calipso bruger laserstråler til at bestemme aerosolernes art, størrelse, geometrier, mængder og vertikale fordeling inde i skyerne.

Den kontroversielle solteori

Henrik Svensmark, som er klimaforsker ved Danmarks Rumcenter, har en alternativ forklaring på opvarmningen af kloden. Nemlig, at temperaturstigningerne skyldes variationer i solaktiviteten. Den kontroversielle teori har vakt betydelig opsigt verden over.

Studier af klimaarkiver som iskerner og træringe viser en god sammenhæng mellem variationer i solaktiviteten og klimasvingninger langt tilbage i tiden. Forskellen mellem Solens største og mindste udstråling er imidlertid lille – 0,1 procent – og det påvirker ikke klimaet på Jorden tilstrækkeligt til at forklare opvarmningen gennem det seneste århundrede.

Nøglen til, at variationer i solaktiviteten alligevel kan spille en central rolle, er



Figur 3.6
Aktivitet på Solens overflade påvirker mængden af kosmisk stråling til atmosfæren, hvilket kædes sammen med skydannelse og klimasvingninger.

Solens magnetfelt – heliosfæren – der omspænder hele solsystemet som et gigantisk magnetisk skjold. Når solaktiviteten topper, er det magnetiske skjold stærkere, end når solaktiviteten er mindst, og det påvirker mængden af kosmisk stråling fra Mælkevejen, som rammer atmosfæren. Strålingen består især af protoner, og i de perioder, hvor magnetfeltet er stærkt, afbøjes en stor del af protonerne fra rummet, så de ikke kommer ind i solsystemet. Omvendt trænger flere af partiklerne igennem skjoldet og ind i Jordens atmosfære, når Solens magnetfelt er svagt. Gennem de seneste 100 år er styrken af Solens magnetfelt blevet øget markant.

Kosmisk stråling og skydannelse

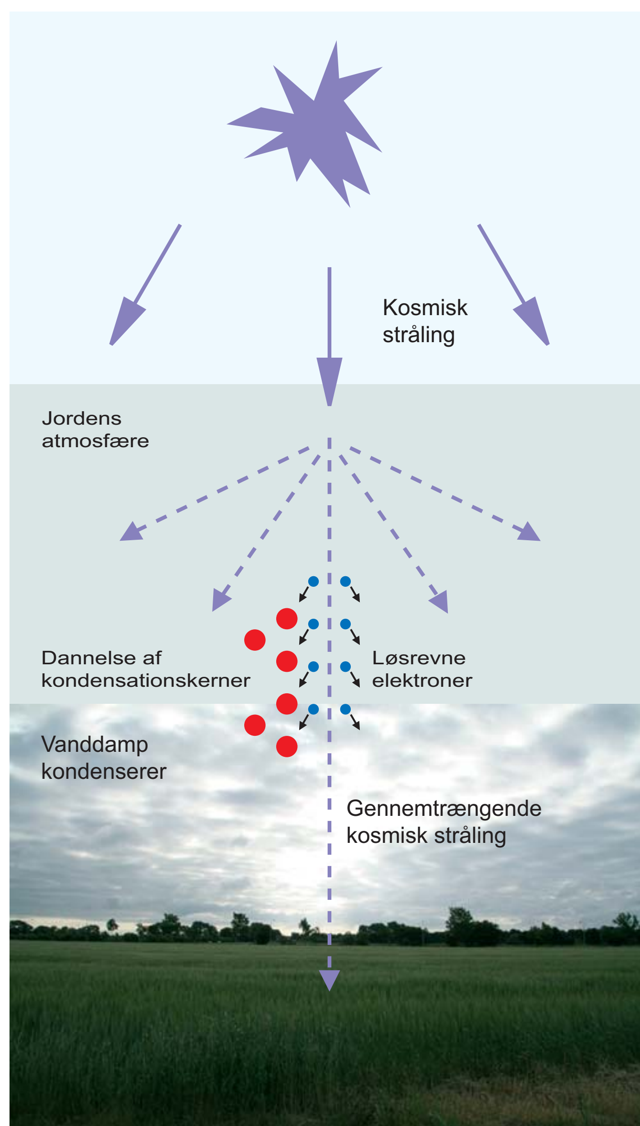
Henrik Svensmarks teori går ud på, at den kosmiske stråling fremmer skydannelsen i den nedre del af atmosfæren. Så jo mindre solaktivitet, jo svagere magnetfelt og jo mere kosmisk stråling – jo flere lave skyer dannes der, og jo koldere bliver klimaet. Omvendt begrænser høj solaktivitet og et stærkt magnetfelt den kosmiske stråling og dermed skydannelsen, hvilket fører til opvarmning, fordi jordoverfladen modtager mere direkte solindstråling.

På det fysiske plan bygger teorien på, at den kosmiske stråling ioniserer molekylerne i atmosfæren. Eksperimenter på Dansk Rumcenter har vist, at ioniseringen fremmer samlingen af små klynger af svovlsyremolekyler, der kan fungere som kondensationskerner for dannelsen af dråber og dermed af skyer. Processen undersøges nu i et større eksperiment på det europæiske fysikcenter CERN i Geneve, hvor acceleratorer leverer protoner med energier som i den kosmiske stråling.

For nylig er solteorien kommet i modvind, fordi det kniber med at forklare opvarmningen af kloden efter årene 1985-1987, hvor solaktiviteten nåede et maksimum.

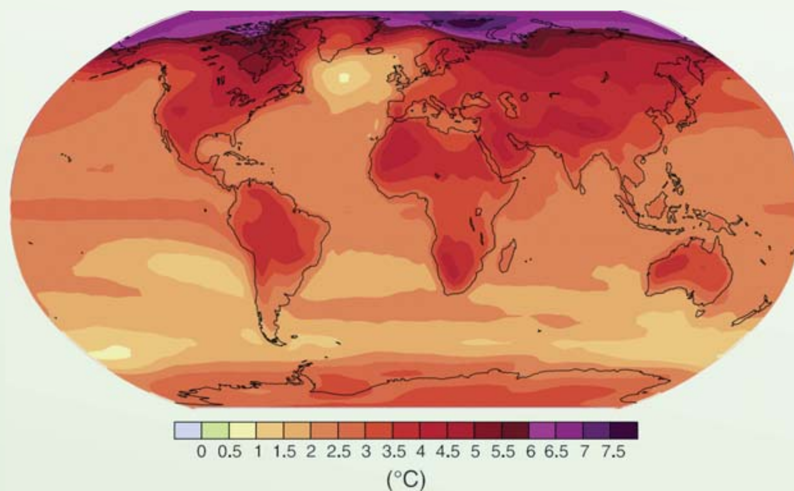
Alligevel kan solteorien muligvis være rigtig, og i givet fald er perspektivet foruroligende. For så er afkølingen som følge af faldende solaktivitet blevet overdøvet af den menneskeskabte drivhuseffekt i de senere årtier. Hvis det er tilfældet, er klimasystemet måske mere følsomt overfor drivhusgasser end antaget, og fremtidige temperaturstigninger kan blive større end forventet, når solaktiviteten igen kulminerer.

Henrik Svensmarks teori indgik ikke i basismaterialet til IPCC's klimarapport fra 2007.



Figur 3.7
Skematisk fremstilling af teorien om sammenhængen mellem kosmisk stråling og skydannelse.

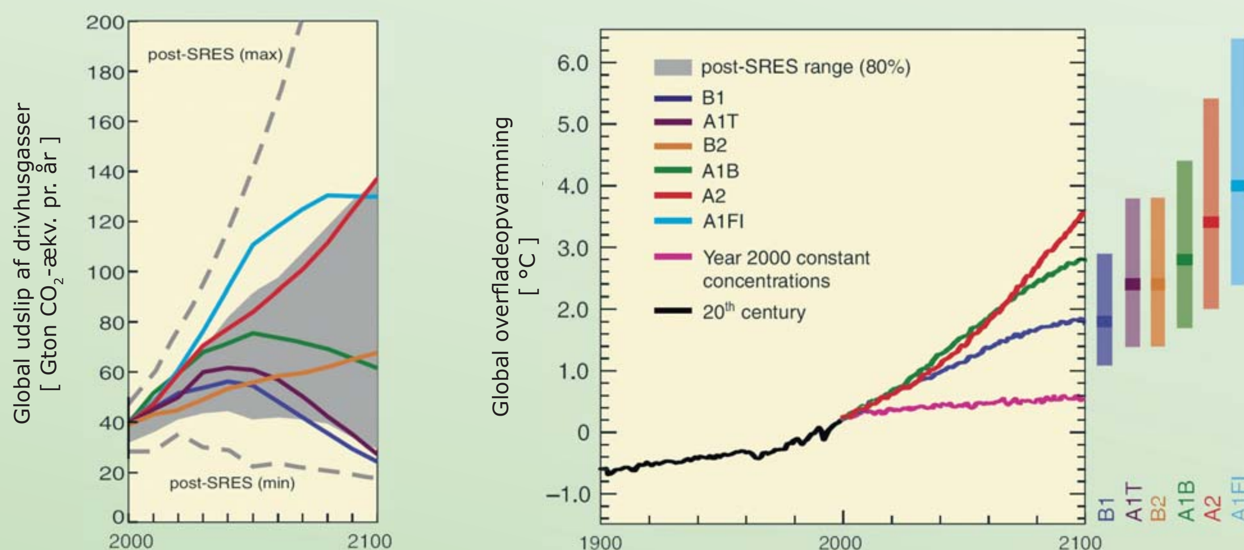
En varmere verden



Figur 4.1
IPCC's bud på den forventede regionale fordeling af temperaturstigningerne frem mod år 2100. Den mest markante opvarmning vil ramme de følsomme højarktiske områder.

Frem mod år 2100 forudser IPCC øget global opvarmning, stigende havvandstand og dramatiske regionale klimaændringer. Millioner af mennesker rammes, hvis verden opvarmes med mere end 2 grader.

Med den nuværende klimapolitik rundt omkring i verden vil de globale udslip af drivhusgasser være steget med 25–90 procent om året i 2030, hvilket sandsynligvis vil føre til større klimaændringer i dette århundrede end i det sidste.



Figur 4.2
Til venstre: De farvede linier viser forskellige modelberegninger af, hvor meget verdens udslip af drivhusgasser vil stige frem mod år 2100, hvis den nuværende udvikling fortsætter. De stiplede linier viser det mulige interval.

Til højre: IPCC's bud på globale temperaturstigninger i perioden alt efter udslippenes størrelse. Søjlerne viser usikkerheden i de enkelte scenarier. Den nederste røde linie repræsenterer et scenarium, hvor udslippene holdes konstant på 2000–niveau.

I 2007–rapporten forudser IPCC, at gennemsnitstemperaturen på globalt plan vil stige med mellem 0,6 og 4 grader frem mod år 2100. Klimapanelet understreger dog, at der er usikkerhed omkring den øvre grænse, fordi det er svært at sætte tal på, hvor meget opvarmningen vil formindske oceanernes og landjordens kapacitet til at optage CO_2 fra luften. Et reduceret optag indebærer, at en større del af det menneskeskabte udslip akkumuleres i atmosfæren.

Tilsvarende er det vanskeligt at sætte en øvre grænse på, hvor meget vandstanden i havene vil stige i løbet af århundredet på grund af usikkerhed omkring bidraget fra Jordens store iskapper. Estimatet ligger på mellem 0,18 og 0,59 centimeter.

Isen smelter i Arktis

Opvarmningen af kloden vil slå kraftigst igennem i Arktis, hvor intervallet for temperaturstigninger ligger på 4–7 grader frem mod år 2100. Tre jokere er i spil: Indlandsisen, havisen og de enorme permafrosne områder.

Figur 4.3
De store gletschere på Grønland har overrasket klimaforskerne ved at accelerere voldsomt i de seneste år. Her ses isranden på Ilulissat Isbræ.

Indlandsisen er på skrump

Når klimaet bliver varmere, afgiver Jordens store iskapper masse på grund af øget afsmeltning og kælvning af isbjerge. Til gengæld får de tilført masse via øget nedbør, fordi fordampningen fra havene stiger, og fordi varmere luft kan indeholde mere vanddamp. Verdens største iskappe på Østantarktis vokser langsomt for tiden, fordi massetilførslen fra nedbør overstiger afsmeltningen, og indtil for nylig mente klimaforskerne, at de to processer var i balance, når det gælder iskapperne på Vestantarktis og Grønland.

Nye satellitmålinger har imidlertid vist, at afsmeltningen fra Indlandsisen nu stiger, og samtidig er flydehastigheden i de grønlandske gletschere øget dramatisk. Derfor er iskappen svundet ind med 300 kubikkilometer om året siden 2004, hvor IPCC's datasæt stopper. Hvis den udvikling fortsætter, vil smeltevandet fra Indlandsisen få verdenshavene til at stige med 60 centimeter i løbet af århundredet. Iskappen indeholder vand nok til at hæve havvandstanden med 7 meter, hvis den smelter helt.

I den sammenhæng er der videnskabeligt fokus på Indlandsisens opførsel i den sidste varme mellemistid for 130.000–116.000 år siden, fordi det dengang var 5 grader varmere i Grønland end nu, mens vandstanden i oceanerne var seks meter højere end i dag. Set med de briller er det beroligende, at Eske Willerslev fra Københavns Universitet for nylig fandt 450.000–850.000 år gammelt DNA fra træer og planter i bundisen fra Dye–3 iskernen, som er udboret i Sydgrønland. Opdagelsen viser nemlig, at den sydlige del af iskappen, som er mest udsat for smeltning, ikke brød sammen i den varme Eemtid, hvilket nogle modelberegninger ellers har tydet på. I givet fald ville alt DNA fra tidligere økosystemer være blevet udslettet.

Nye modelberegninger, som er udført af Dorthe Dahl–Jensen fra Københavns Universitet peger på, at isdækket i Sydgrønland svandt ind til en kilometers højde i Eemtiden – mod to kilometer i dag – og at afsmeltningen fra hele Indlandsisen bidrog med to meter af vandstandsstigningen i havene, men heller ikke mere.

Havisen forsvinder om sommeren

I september 2007 dækkede havisen i det Arktiske Ocean kun 4,13 millioner kvadratkilometer. Det er 2,61 millioner kvadratkilometer mindre end gennemsnittet for perioden 1979–2000; et svind, der svarer til størrelsen af Alaska og Texas til sammen. Baggrunden er, at luftens middeltemperatur i Arktisk er steget med 1,5 grader gennem de seneste 100 år, hvilket er dobbelt så meget som opvarmningen på verdensplan. Derfor smelter havisen tidligere og kraftigere om foråret og hen over sommeren.

Havisens indskrænkning er en selvforstærkende proces på grund af albedoeffekten. Mens den hvide is reflekterer det meste af Solens lys tilbage i rummet, opsuger det åbne hav størstedelen af sollysets varme, og når Solen begynder at forsvinde i Arktis om efteråret, frigives den oplagrede varme i havoverfladen til luften. Så jo mere åbent vand, jo mere forstærkes opvarmningen og smeltningen af isen. Nogle klimamodeller peger på, at Polhavet bliver isfrit om sommeren allerede i 2040.

Dét vil ændre livsvilkårene radikalt for mennesker, dyr og planter i Arktis. Skibsfarten, olieindustrien og fiskeriet får kronede dage, mens inuitternes traditionelle livsstil baseret på fangst må tilpasse sig til en ny situation med et ændret dyreliv. Hele fødekæden vil nemlig forandre sig fra de mikroskopiske alger på havisens underside og hele vejen op til hvaler, sæler, hvalrusser og selve symbolet på det arktiske dyreliv – isbjørnen – som kan blive truet af udryddelse.



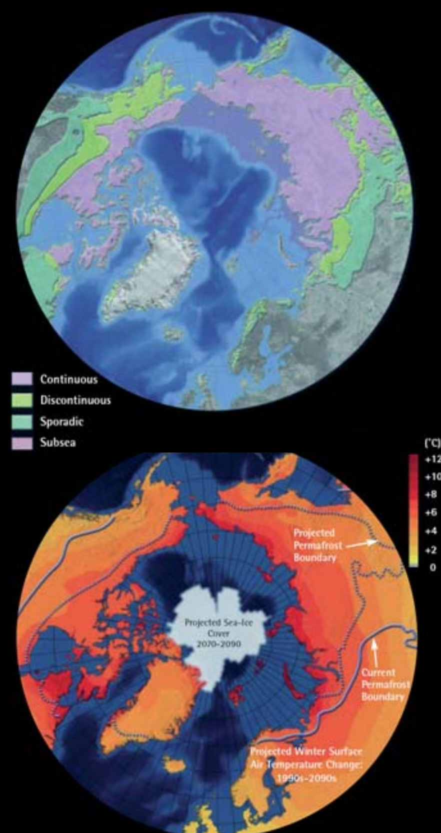
Figur 4.4
Havisen i Polhavet satte ny minimumsrekord i september 2007. Den røde streg viser den gennemsnitlige udbredelse af havisen for perioden 1979–2000.

Permafrosten tør

Permafrost dækker en fjerdedel af landjorden på den nordlige halvkugle. Syd for den arktiske cirkel er det permafrosne lag i undergrunden ofte kun nogle få meter tykt, men i de polare områder kan tykkelsen være på flere hundrede meter.

Permafrosne landområder i de sydlige dele af Alaska og Sibirien er allerede begyndt at tø, og de forventede temperaturstigninger på 4–7 grader frem mod år 2100 kan få store arealer til at tø op. Konsekvenserne bliver landskred, sammenbrud af veje, huse og olierørledninger, væltede skove, og søer, der forsvinder, fordi smeltningen af undergrunden medfører, at de drænes til grundvandet.

Siden istidens slutning er der blevet oplagret kulstof i de permafrosne områder i Arktis. Planterne, der gror i det aktive jordlag oven på den frosne undergrund, suger CO_2 ud af luften og lagrer kulstof i jordbunden, fordi døde planter ikke rådner på grund af kulden. Når permafrossen jord tør op, omsætter mikroorganismer det organiske stof og frigiver kuldioxid eller metan til atmosfæren. Hvis permafrosten svinder ind for alvor, vil der ske enorme udslip af de to drivhusgasser, og det vil forstærke drivhuseffekten.

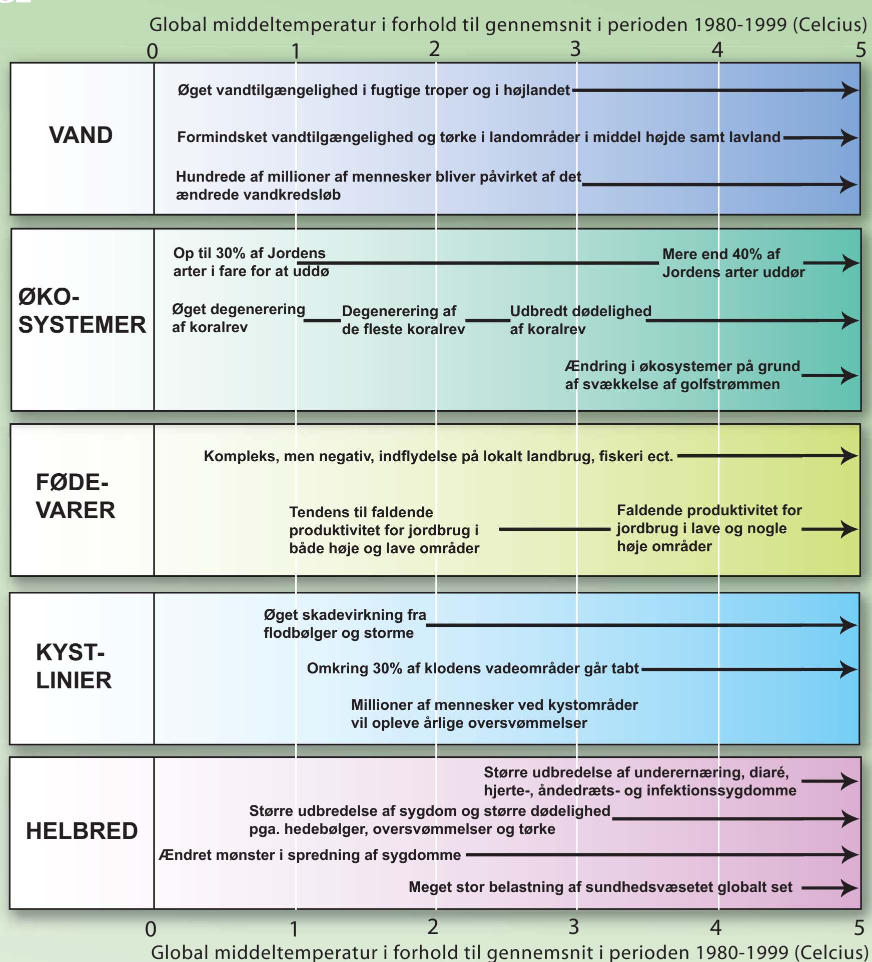


Figur 4.5
Øverst: Permafrosne områder på den nordlige halvkugle i dag.
Nederst: Den fuldt optrukne blå linie viser den nuværende grænse for permafrosten, mens den stiplede linie viser den forudsagte grænse ved udgangen af århundredet.

Smertegrænse på 2 grader

Følgerne af den menneskeskabte drivhuseffekt vil afhænge stærkt af, hvor meget temperaturen stiger. Hvis det lykkes at holde den globale opvarmning på under 2 grader, vil følgerne blive moderate, mens større temperaturstigninger kan få dramatiske konsekvenser.

I givet fald ventes nedbørsmønstret at ændre sig, så nedbøren i højere grad falder på de høje breddegrader og i de våde tropiske områder, mens de tørre tropiske og subtropiske områder vil få mindre regn. Det vil i følge IPCC medføre, at flere hundrede millioner mennesker kommer til at leve med vandmangel. Når det gælder fødevarer, ventes produktionen af korn at falde på de lave breddegrader.



Figur 4.6
IPCC's vurdering af, hvordan stigende temperaturer vil påvirke mennesker og økosystemer på Jorden. De omtalte konsekvenser indtræffer ved pilenes begyndelse.

Mange økosystemer kommer under pres, og for op til 30 procent af alle arter vil risikoen for at uddø stige. I kystområderne vil der blive værre ødelæggelser fra storme og flodbølger. Årligt tilbagevendende oversvømmelser kan blive en plage for millioner af mennesker ved kyster, der sjældent oversvømmes i dag. Verdens koralrev, fx de berømte rev i Australien, forventes at blive stærkt reducerede.
På sundhedsområdet vil der være øgede belastninger ved temperaturstigninger på 3–5 grader på grund af underernæring, diarre, hjertesygdomme og lungesygdomme. Desuden vil infektionssygdomme som malaria sandsynligvis udbrede sig til nye områder på Jorden.

Allerede omkring 2020 kan Afrika blive hårdt ramt af vandmangel og faldende fødevareproduktion, og senere i århundredet ventes store dele af Asien, Australien og Sydeuropa at opleve stigende mangel på ferskvand. I de sydlige og østlige Asien stiger risikoen for oversvømmelser både fra havet og de store floder. I Sydeuropa vil hedebølger og tørke skabe problemer for vandforsyningen, agerbruget og sommerturismen, mens Nordeuropa ventes at blive ramt af flere oversvømmelser.

Til gengæld vil vintrene blive mildere. I Europas bjergegne vil gletscherne svinde ind, og mange arter vil komme i fare for at uddø. I Sydamerika ventes regnskoven i det østlige Amazonas at blive erstattet af savanne, og et stort tab af tropiske arter forudses. I dele af Nordamerika vil agerbruget nyde godt af øget nedbør i begyndelsen af århundredet, men senere vil voldsomme hedebølger i stigende grad plage mange storbyer. Adskillige lavtliggende øer som fx Maldiverne i det Indiske Ocean risikerer at blive oversvømmet af havet.

Danmark ligger i en af de regioner i verden, hvor de negative effekter af klimaændringerne bliver beskedne. Somrene ventes at blive varmere og mere tørre, hvilket sandsynligvis være til gavn for landbruget.



Figur 4.7
Forsuringen af havene er en trussel for koralrev som Great Barrier Reef ved Australiens nordøstlige kyst.

Havene forsures

I de seneste to århundreder har verdenshavene optaget halvdelen af den CO_2, som menneskene har lukket ud i atmosfæren via afbrænding af fossile brændstoffer. Det har forsuret havvandet. pH–værdien er faldet fra 8,2 til 8,1, og IPCC vurderer, at pH–værdien i de øvre vandlag vil blive yderligere reduceret med 0,14–0,35 enheder frem mod år 2100.

Forsuringen af oceanerne kan få uoverskuelige konsekvenser for koraller, bløddyr, snegle, hummere, krebs, søstjerner, alger og forskellige former for zooplankton og planteplankton, der enten opbygger kalkskaller eller har ydre kalkskeletter. I første omgang vil den sænkede pH–værdi i havvandet gøre det sværere at danne skaller og skeletter, og på længere sigt kan forsuringen medføre, at kalken simpelt hen opløses.

I første omgang truer forsuringen af oceanerne især de tropiske og subtropiske koralrev, som er vigtige habitater for dyr og planter, og som spiller en central rolle for menneskene som leverandør af fisk og som attraktion for turistindustrien. Men det kan blive værre endnu. Allerede om 50 til 100 år er der risiko for, at havets fødekæde – især i Sydhavet – kommer ud af balance, fordi en gruppe små havsnegle, pteropoder, er særligt sårbare. I de kolde have omkring Antarktis udgør sneglene en central del af fødegrundlaget for krill, fisk, havfugle og havpattedyr.

I løbet af Jordens lange historie har der i perioder været mere CO_2 i atmosfæren end nu, men man mener ikke, at det tidligere har givet anledning til forsuring af havene i det hæsblæsende tempo, som ses i dag på grund af den hurtige stigning i de atmosfæriske CO_2–koncentrationer. Det britiske videnskabsakademi, Royal Society, har vurderet, at forsuringens hastighed sandsynligvis er 100 gange større end nogensinde gennem flere hundreder millioner af år. Netop hastigheden gør situationen kritisk, fordi havet ikke kan nå at modvirke forsuring i overfladen via blandingsprocesser i vandsøjlen.

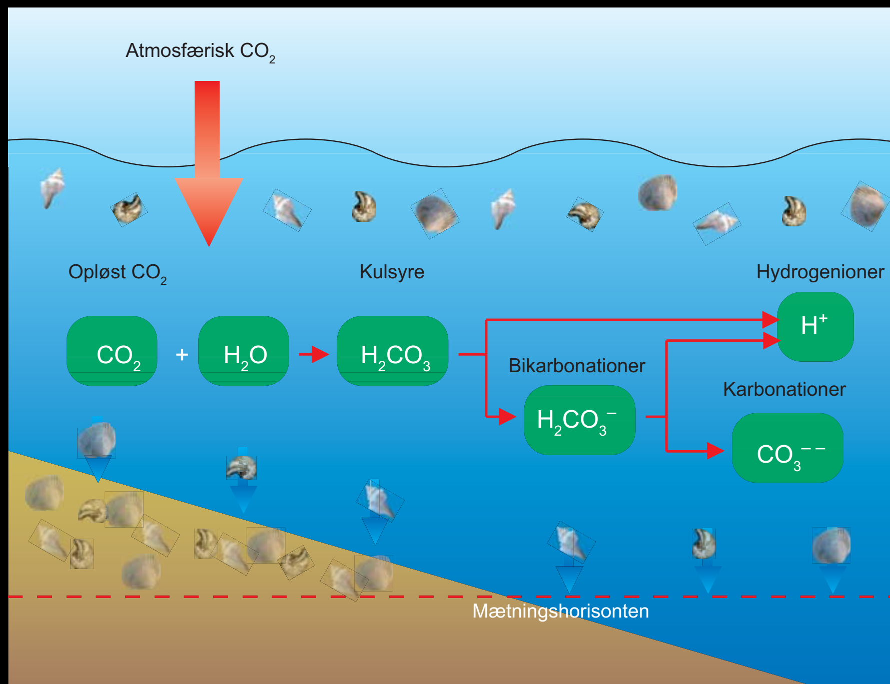
Forsuringen er irreversibel i overskuelig fremtid. Hvis surhedsgraden i den øverste halve kilometer af havvandet først bliver for høj til marine organismer med kalkskaller og kalkskeletter, kan der gå titusinder af år, før opblandingen af havvandet igen har reduceret pH–værdien i overfladen til et førindustrielt niveau.

Forsuringen truer skaldyr

Dyr og plankton med kalkskaller kan kun leve i havet over den såkaldte mætningshorisont, for længere nede er vandet for surt til, at der kan dannes kalkskaller.

Havet optager kuldioxid fra atmosfæren, og siden år 1800 har tilførslen af CO_2 fra menneskeskabte udslip rykket mætningshorisonten 50–200 meter op i vandsøjlen. Marine dyr og plankton danner kalkskaller og skeletter med to forskellige krystalstrukturer; aragonit og calcit. Aragonit er mest følsom overfor forsuring, og her ligger mætningshorisonten nu i 0,5 til 2,5 kilometers dybde, mens mætningshorisonten for calcit befinder sig mellem 1,5 og 5 kilometer under havoverfladen.

Når havvandet optager CO_2, reagerer gassen med vand og danner kulsyre (H_2CO_3), og der frigives brintioner (H^+), som bestemmer vandets surhedsgrad. Når kulsyre afgiver brintioner, omdannes syren enten til bikarbonat (HCO_3^{-1}) eller til karbonationer (CO_3^{-2}). Det er karbonationerne, som marine organismer udnytter til at opbygge skaller og skeletter via en reaktion med calcium, så der dannes calciumkarbonat ($CaCO_3$). Umiddelbart skulle man tro, at et øget CO_2–optag fra atmosfæren ville øge tilgængeligheden af karbonationer i havvandet, men i praksis er det stik modsatte tilfældet, fordi karbonationerne reagerer med de frie brintioner og danner bikarbonat, som ikke er egnet til dannelse af kalk.



Figur 4.8

Golfstrømmen – klimasystemets bøhmand manet i jorden

Hollywood og katastrofefilmen “The day after tomorrow” har gjort sit til at iscenesætte Golfstrømmen som klimasystemets store stygge bøhmand. Skrækscenariet går ud på, at overfladevandet i Nordatlanten tilføres så meget ferskvand fra smeltende gletschere og de store sibiriske floder, at nedsynkningen nord for Island går i stå. Så kollapser den globale havcirkulation, og Golfstrømmen, der opvarmer Nordeuropas og Skandinaviens kyster, slukker. Konsekvensen bliver et pludseligt temperaturfald på 4 grader i vor del af verden.

I 2006 fik hypotesen videnskabelig næring, da Harry Bryden fra National Oceanographic Centre i England offentliggjorde målinger af Golfstrømmen, som tydede på, at styrken af den nordgående arm blev formindsket med 30 procent fra 1957 til 2004. Senere målinger i et internationalt program har heldigvis vist, at den tilsyneladende svækkelse ligger inden for den naturlige variabilitet. Konklusionen er, at Golfstrømmen er i fin form.

IPCC vurderer, at Golfstrømmen vil blive svækket en smule frem mod år 2100, men at en kollaps er usandsynlig. På længere sigt er det umuligt at give et pålideligt bud på, hvordan opvarmningen af Jorden vil påvirke havcirkulationen i Nordatlanten.

Fokus på økosystemer

Et centralt spørgsmål i forbindelse med de globale klimaændringer er, hvordan økosystemer verden over vil reagere på opvarmningen af kloden.

Her var danske forskere på forkant, da de i begyndelsen af 1990'erne fik etableret forskningsstationen Zackenberg i Nordøstgrønland. Filosofien var, at man ville observere de forventede klimaændringer fra starten i uberørte højarktiske økosystemer, hvor opvarmningen slår først og stærkest igennem. Derfor udvalgte forskerne et område med vidt forskellige landskabstyper samt et rigt og varieret planteliv og dyreliv. Målet var gennem en årrække at skaffe sig et detaljeret kendskab til økosystemets naturlige tilstand, så det er muligt at påvise økologiske konsekvenser af et varmere klima. En detaljeret naturgeografisk, botanisk og zoologisk kortlægning blev indledt i 1995.

I dag er der sket tydelige forandringer. Foråret starter nu to uger tidligere end for ti år siden, hvilket kan ses af, at fuglene lægger æg, og planterne blomstrer 14 dage tidligere end før. Om tendensen vil fortsætte er uvist. For lunere vintre kan medføre øget snefald på grund af øget fordampning fra havene, og et tykkere snedække kan tage længere tid om at smelte og på den måde udsætte forårets komme.

Planters respons på et varmere klima undersøges også i Danmark. I fremtiden skal økosystemerne fungere under vilkår, som er markant forandret – en øget koncentration af kuldioxid i luften, højere temperaturer og ændrede nedbørsmængder.

Alle tre forhold undersøges nu i eksperimentet CLIMAITE på det militære øvelsesterræn i Jægerspris. Via udblæsning af CO_2 omkring forsøgsfeltet forhøjes koncentrationen af drivhusgassen i luften med 35 procent svarende til IPCC's forudsigelse for 2075. Opvarmning skabes ved at trække et gardin hen over vegetationen om aftenen, hvilket reducerer tilbagestrålingen af varme til atmosfæren. I Danmark ventes nedbøren at falde om foråret og sommeren. Derfor styrer en regnsensor automatiske gardiner, som overdækker forsøgsfelterne i de relevante perioder.

CLIMAITE blev startet i 2005, og de første resultater blev offentliggjort i 2007.



Figur 4.9
Der er stor international interesse for forskningen på Zackenberg stationen i Nordøstgrønland.



Figur 4.10
CLIMAITE forsøget i Jægerspris skal afklare, hvordan danske planter vil reagere på de forudsagte klimaforhold i 2075. Den udfoldede markise rulles normalt ud om natten, hvor den holder på varmen. Den hængende markise kan udfoldes og fjerne nedbør. I baggrunden ses CO_2–tanken, som leverer forhøjede koncentrationer af kuldioxid til planterne.

Her satte forskerne fokus på, om planterne var i stand til at udnytte den ekstra CO_2 i luften til vækst i tørkeperioder. Når planter udsættes for tørke, lukker de normalt bladenes spalteåbninger for at undgå tab af vanddamp. Prisen er, at fotosyntesen og dermed væksten går i stå, fordi planterne ikke kan trække kuldioxid fra luften ind gennem de lukkede spalteåbninger.

Observationerne viser imidlertid, at når der er forhøjede koncentrationer af CO_2 i luften, kan planterne åbne spalteåbningerne på klem. På den måde får planterne CO_2 nok til fotosyntesen, samtidig med at de sparer på vandet, så de kan modstå tørken. Forsøget viser, at almindelige danske planter tilsyneladende kan opretholde en vis vækst under de tørkeperioder, som meteorologerne forudsiger i den sidste del af århundredet. Det er en god nyhed for landbruget.

Hvordan begrænser vi opvarmningen af Jorden?



Figur 5.1
Vindeby offshore. Verdens første havvindemøllepark blev etableret 1990 i havet ud for Lolland.

Hvis temperaturstigningerne frem mod år 2100 skal holdes under klimasystemets smertegrænse på 2 grader, kræver det at verdens udslip af drivhusgasser begynder at falde allerede i 2015.

Det bliver svært at holde de globale temperaturstigninger på under 2 grader i løbet af århundredet, vurderer Kirsten Halsnæs fra Forskningscenter Risø. Hun var en af hovedforhandlerne i IPCC's Arbejdsgruppe III, hvor eksperterne undersøgte, hvordan og til hvilken pris atmosfærens indhold af drivhusgasser kan stabiliseres på forskellige niveauer. De undersøgte niveauer spænder fra 445 CO_2–ækvivalenter pr. million partikler i atmosfæren (ppm) – svarende til lidt over den nuværende koncentration – og til 1130 ppm. De forskellige koncentrationer forventes at medføre temperaturstigninger på mellem 2 og 6,1 grader.

Den atmosfæriske levetid af kuldioxid er 50–200 år, mens metan opholder sig knap 10 år i atmosfæren. For at begrænse opvarmningen til 2 grader frem mod år 2100, er det nødvendigt, at de samlede udledninger af drivhusgasser allerede topper i 2015 for derefter at falde.

Imidlertid er der kun få studier over, hvordan dét kan opnås i praksis, og på den baggrund vurderer Kirsten Halsnæs, at det bliver vanskeligt at gennemføre så store reduktioner – selv i en situation, hvor den politiske vilje er til stede på klimatopmødet i København i 2009. IPCC estimerer på det foreliggende grundlag, at prisen for at begrænse opvarmningen til 2 grader i løbet af århundredet bliver en nedgang i det globale bruttonationalprodukt på omkring 3 procent.

3 grader er realistisk

De bedst undersøgte scenarier for stabilisering af drivhusgasserne i atmosfæren ligger i området fra 550–570 ppm, som ventes at medføre en temperaturstigning på lige under 3 grader. Her skal de globale udslip af drivhusgasser nedbringes med 30 procent inden 2030 målt i forhold til år 2000. IPCC vurderer, at indsatsen vil formindske verdens bruttonationalprodukt med lidt over 1 procent

Betydelige reduktioner i de globale udslip af drivhusgasser kan opnås inden for energiforsyning, transport, bygninger, industri, landbrug, skovbrug og affaldsbehandling. Blandt de mest økonomisk fordelagtige tiltag er energibesparelser i alle sektorer og udskiftning af gamle og ineffektive kraftværker med moderne kraftvarmeværker, hvilket ofte tjener sig

selv ind over en årrække. Mulighederne for hurtige og billige CO_2–reduktioner er størst inden for byggesektoren, hvor 30 procent af de forventede stigninger i udslippene frem mod 2030 kan undgås ved at indrette og udstyre bygninger energiøkonomisk – uden nettoudgifter for verdenssamfundet. Nogle tiltag giver endda overskud i løbet af få år, fx effektiv isolering af nybyggeri og forbedret isolering af eksisterende bygninger i forbindelse med ombygninger.

Tabellen nedenfor og på næste side giver et overblik over mulighederne for at begrænse verdens udslip af drivhusgasser:

Klimatopmødet i København

I 2009 mødes alverdens lande til klimatopmøde i København, hvor målet er at blive enige om en global klimastrategi, som skal afløse Kyotoprotokollen.

Den helt centrale spiller bliver USA, som gennem mange år har været verdens største udleder af drivhusgasser. USA er ikke med i Kyotoprotokollen, og det er afgørende at få supermagten med i en ny aftale; helst med bindende reduktionsmål. For hvis USA stiger af, vil det næppe lykkes at få de store udviklingslande, Kina og Indien, med ombord. Her vokser CO_2–udslippene mest for tiden – Kina ventes at overgå USA om få år – men Kina og Indien slår på, at de rige industrilande har det primære ansvar for den igangværende opvarmning af kloden, og derfor forventer de, at Vesten går i spidsen med at begrænse de fremtidige udslip af drivhusgasser.

Forhandlingerne i København bliver benhårde. Og afgørende for klodens fremtid.

Sektor	Eksisterende teknologier	Nye teknologier frem mod 2030
Energiforsyning 	– Begrænsning af energispild ved produktion og distribution. – Skift fra kul til naturgas. – Øget brug af kraftvarme. – Udbygning af vedvarende energi såsom sol, vind, biomasse og geotermi. – Udbygning af atomkraften.	– Deponering i undergrunden af CO_2 fra kulfyrede kraftværker. – Avanceret atomkraft. – Bølgeenergi og tidevandsenergi. – Avancerede solkraftværker.
Transport 	– Mere energiøkonomiske biler inklusive hybridbiler og renere dieselbiler. – Skift fra vejtransport til tog og andre kollektive transportsystemer. – Bedre transportplanlægning. – Øget brug af ikke–motoriseret transport såsom cykling.	– Anvendelse af 2. generations biobrændsler i biler. – Mere energiøkonomiske fly. – Avancerede elbiler og hybridbiler med forbedrede batterier.

Bygninger



- Mere energieffektiv belysning og bedre udnyttelse af dagslys.
- Elektriske apparater med lavere energiforbrug.
- Mere energieffektiv opvarmning og afkøling.
- Forbedrede komfurer.
- Forbedret isolering af boliger og erhvervsbygninger.
- Øget brug af solvarme.

- Intelligente bygninger med avanceret energistyring baseret på sensorer.
- Integration af solcellepaneler i nye bygninger.

Industri



- Mere energieffektivt elektrisk produktionsudstyr.
- Genindvinding af varme.
- Energioptimering af en lang række produktionsprocesser.

- Avancerede energibesparende teknologier.
- Deponering af CO_2 i undergrunden fra industrier med store udslip; fx cementindustrien og jern– og metalindustrien.

Landbrug



- Forbedret styring af afgrøder og forbedret management af landbrugsjorden med henblik på at øge optaget af CO_2 i jordbunden.
- Forbedret dyrkning af ris med henblik på at begrænse udslip af metan.
- Forbedret kvægdrift og gyllehåndtering for at nedbringe metanudslippene.
- Forbedret gødningsanvendelse for at reducere udslip af kvælstofilter.
- Dyrkning af energiafgrøder for at spare fossile brændsler.

- Udvikling af mere højtydende afgrøder.
- Brug af restprodukter som halm og majsstængler til 2. generations biobrændsler.

Skovbrug



- Skovrejsning.
- Brug af restbiomasse til energiproduktion til afløsning af fossile brændstoffer.

- Forbedring af træers evne til at optage CO_2 fra luften.
- Forbedret vækst og biomasseproduktion.

Affald



- Udnyttelse af metanudslip fra lossepladser.
- Øget genbrug og minimering af affaldsmængderne.

- Biofiltre til oxidation af metan.

Deponering af CO_2 i undergrunden

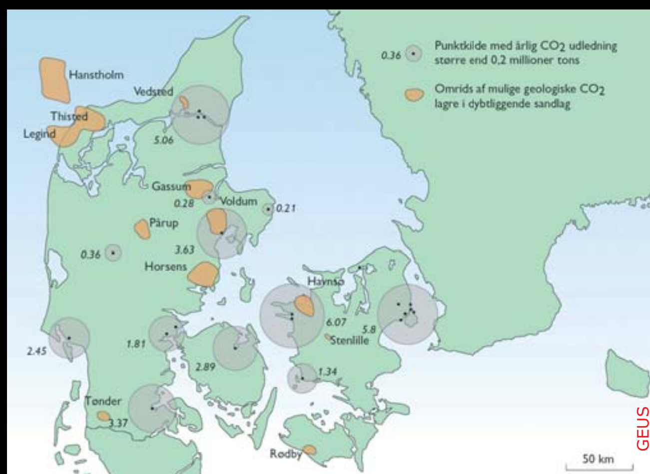
Geoengineering er en ny – og omdiskuteret – mulighed til at reducere verdens CO_2–udslip.

En form for geoengineering, som allerede er i spil, og som helt sikkert vil få betydelig udbredelse i de kommende årtier, går ud på at returnere kulstof til jordskorpen ved at deponere CO_2 i undergrunden.

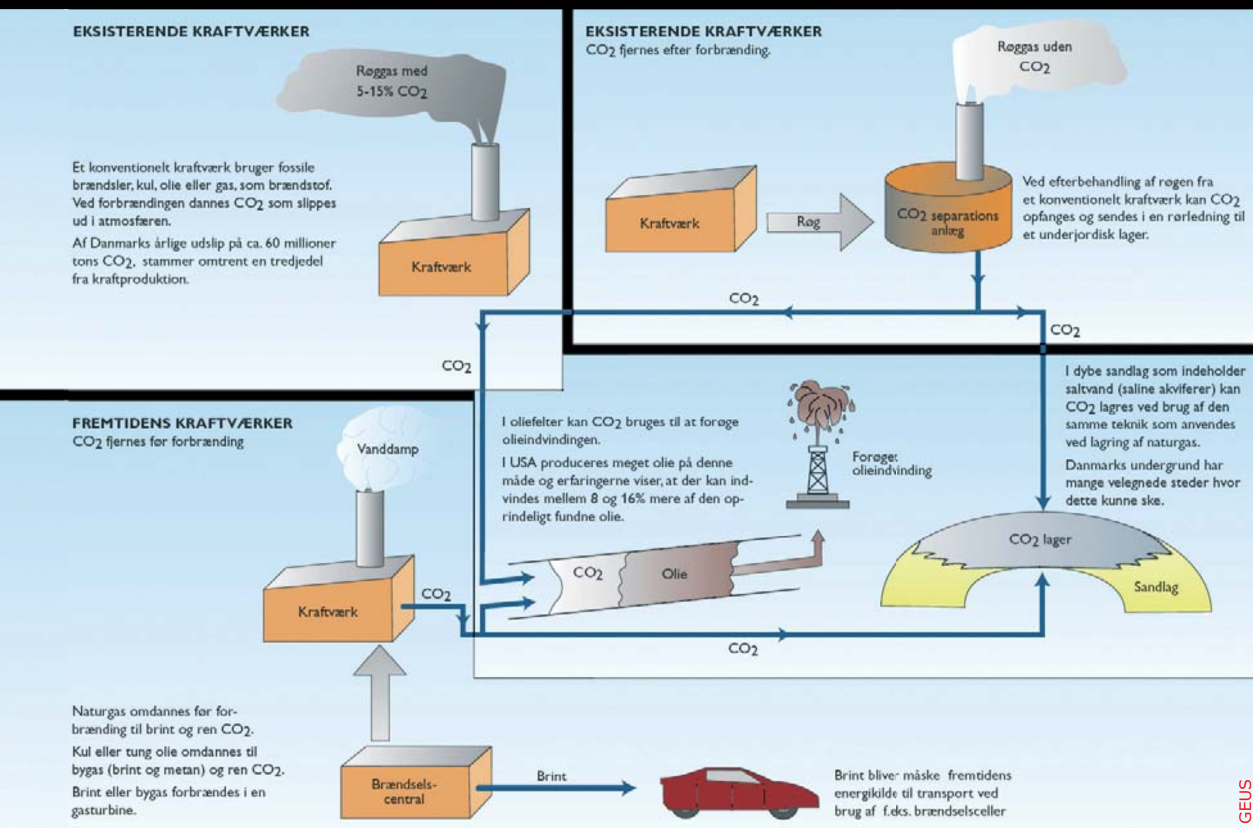
Norske Statoil var pionerer på området for over ti år siden. På det store naturgasfelt Sleipner i Nordsøen indeholder gassen 5–10 procent CO_2, men naturgas må kun indeholde op til 2,5 procent CO_2, når gassen leveres til forbrugerne. Derfor separeres kuldioxiden fra, og i begyndelsen blev drivhusgassen lukket ud i atmosfæren. Men siden 1996 er kuldioxiden blevet pumpet en kilometer ned i undergrunden og lagret her. Økonomien er baseret på, at Statoil slipper for CO_2–beskatning.

I USA og Canada bruges nedpumpning af kuldioxid i oliefelter flere steder til at øge olieudvindingen. Fidusen er, at CO_2 fortynder olien og får den til at flyde lettere hen imod produktionsbrøndene. Derfor kan man typisk udvinde 8–16 procent mere olie fra et felt, hvilket ofte er rentabelt.

Næste trin bliver kulkraft, hvor røgen renses for CO_2, som derpå begraves i undergrunden i lag af kalk eller sandsten i omkring 800 meters dybde. Den underjordiske lagerkapacitet er stor; fx kan Danmarks undergrund rumme kraftværkernes nuværende CO_2–udslip gennem 575 år. Både Dong Energy og Vattenfall arbejder med planer for at bygge fuldskala demonstrationsanlæg i Danmark omkring 2015.



Figur 5.4
Danmark har gode muligheder for at deponere CO_2 fra kraftværker og andre store punktkilder i undergrunden.



Figur 5.3
Nutidens og fremtidens kraftværker. CO_2 kan enten udskilles før eller efter anvendelsen af brændslet og derpå deponeres i undergrunden.

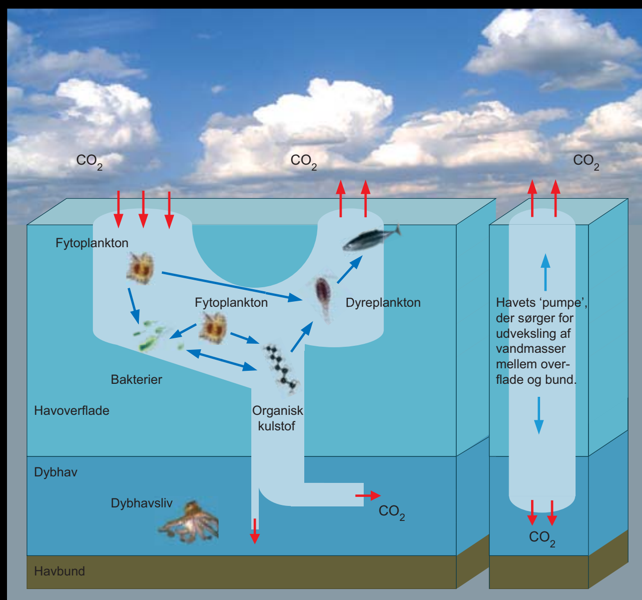
Med plankton til havbunden

Plankton dræner via fotosyntesen atmosfæren for CO_2 og omdanner drivhusgassen til organisk kulstof. Når planktonalgerne dør og synker ned i dybhavet, fjernes kulstoffet fra atmosfæren i omkring tusind år.

I en trediedel af verdenshavene er mangel på jern den begrænsende faktor for planktons vækst, og eksperimenter gennem de seneste ti år har vist, at mængden af plankton kan øges dramatisk simpelt hen ved at smide opløst jern i havvandet fra skibe. Hvis jernet hældes i havet på de rigtige steder, kan plankton trække store mængder kulstof ud af atmosfæren. Det helt rigtige sted er Sydhavet omkring Antarktis. Her indeholder vandet masser af næring i form af kvælstof og fosfor, men ikke ret meget jern, og store mængder overfladevand synker ned i dybet.

Forsøg i Sydhavet har vist, at et enkelt jernatom via opblomstring af plankton trækker 10.000 til 100.000 kulstofatomer ud af atmosfæren, og beregninger tyder på, at jerngødskning af Sydhavet gennem de næste hundrede år kan reducere de forventede koncentrationer af kuldioxid i atmosfæren med en tiendedel.

Jerngødskning af havet er stærkt omdiskuteret. Fx har en af pionererne på området, Sallie Chrisholm fra MIT i USA, advaret om, at vi ved for lidt om påvirkningen af havets kemiske og biologiske kredsløb til at kaste os ud i storstilet brug af jerngødning; en potentiel risiko er opblomstring af giftige alger.



Svovl i atmosfæren

Det nyeste og mest kontroversielle bud på geoengineering kommer fra den amerikanske nobelpristager Paul Crutzen, som var med til at opdage ozonhullerne over Antarktis.

Hans forslag er ret så dramatisk: Send enorme mængder svovl højt op i atmosfæren og antænd svovlet. Så dannes der en masse svovlpartikler, der spredes globalt i stratosfæren, hvor de gennem et år eller to afkøler klimaet ved at reflektere sollys ud i rummet.

Effekten kendes fra store vulkanudbrud, som også sender svovl helt op i stratosfæren. Et eksempel er vulkanen Pinatubos udbrud på Filippinerne i 1991. Udbruddet sendte ti millioner tons svovl højt op i atmosfæren, og året efter faldt den globale gennemsnitstemperatur med en halv grad.

Paul Crutzen er kommet med sit forslag med udgangspunkt i en "voldsom skuffelse" over manglen på international indsats for at reducere de globale udslip af drivhusgasser, og han betegner selv forslaget som "en sidste flugtrute".

Figur 5.5
Omsætning af CO_2 i havet.

Til venstre: Planteplankton omdanner kuldioxid til organisk kulstof, der udgør føden for dyreplankton, som igen ædes af fisk. Når der er overskud af planteplankton, synker dødt plankton ned i dybhavet.

Udvekslingen af CO_2 mellem havet og atmosfæren påvirkes også af opstigning og nedsynkning af vandmasser i havet, hvilket er vist til højre.

FN's klimapanel konkluderede i 2007, at der er 90 procent sikkerhed for, at den nuværende globale opvarmning skyldes det menneskelige udslip af drivhusgasser.

Iskerneboringer viser, at CO_2–indholdet i atmosfæren i dag er hele 35 procent større end for 175 år siden. Det er en stigning som ligger langt ud over de naturlige variationer, og det årlige udslip af CO_2 bliver stadig større.

Ifølge FN's klimapanel er det menneskeskabte CO_2–udslip steget med 70 procent mellem 1970 og 2004, og denne udvikling ser ud til at fortsætte.

Dette hæfte er en samling af de nyeste resultater og er således en status på klimaforskernes billede af fremtidens klima anno 2008.

Jordens klima – fortid og fremtid er et ud af en række hefter med undervisningsmateriale udarbejdet til Naturvidenskabeligt grundforløb. Hæftet er udformet, så det også kan anvendes i Almen studieforberedelse og i individuelle fag. Heftets afsnit lægger i høj grad op til et samarbejde med andre fag.

Hæftet introducerer nogle grundlæggende naturvidenskabelige begreber og giver mulighed for samarbejde mellem alle de naturvidenskabelige fag, men der kan også laves forskellige undervisningsforløb, som vægter fagene forskelligt.

Til hæftet er knyttet en hjemmeside, www.nfa.fys.dk, hvor det er muligt at finde yderligere datamateriale, forslag til undervisningsforløb, eksperimentelle undersøgelser, opgaver og uddybninger.

Naturvidenskab for alle

er udgivet af Fysikforlaget med støtte fra Hovedstadens Udviklingsråd og Undervisningsministeriets tips/lottomidler.

Redaktion, illustrationer og layout:
Niels Elbrønd Hansen

Forfatter:
Rolf Haugaard Nielsen

Produktionsgruppe:
Mathias Egholm,
Philip Jakobsen

Tryk:
Budolfi Tryk, Aalborg

Oplag: 10.000

Billedleverandører:

ACIA Synthesis Report – 22
Australia Adventure – 24
CLIMAITE – 26
Elmuseet – 27
EPICA – 7
GEUS – 30
IODP – 13
IPCC – 14, 15, 20
Lemvig Biogasanlæg – 29
Myriam Louviot – 29
Marilyn Kazmers – 10
National Climate Data Center – 9
North Greenland Icecore Project – 8, 10, 11, 12
National Oceanic & Atmospheric Administration – 8
National Snow and Ice Data Center – 22
NASA – 18
NOAA – 10
Risø – 16
Rob Dunbar – 10
Svante Björk – 12
Zackenberg – 26

Forlaget har søgt at finde frem til alle rettighedshavere i forbindelse med brug af billeder. Skulle enkelte mangle, vil der ved henvendelse til forlaget blive betalt, som om aftale var indgået.

Salg: Lmfk-Sekretariatet
Slotsgade 2, 3. sal
2200 København N
www.lmfk.dk
Tlf. 35 39 00 64

www.nfa.fys.dk

ISSN 1901-869X

